

# GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN LA APLICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN, EN LA EMPRESA SUCROMILES S.A.

EDWIN RAMÍREZ GIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SANTIAGO DE CALI  
2007

GESTIÓN DE LA ENERGÍA EN LA APLICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS  
DE INDUCCIÓN, EN LA EMPRESA SUCROMILES S.A.

EDWIN RAMÍREZ GIL

Trabajo de pasantía para optar al título de Ingeniero Electricista

Director  
ENRIQUE CIRO QUISPE OQUEÑA  
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SANTIAGO DE CALI  
2007

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar el título de Ingeniero Electricista.

Ing. YURI LÓPEZ

---

Jurado

Santiago de Cali, 12 de Julio de 2007

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Occidente por permitirme ser parte de esta gran institución y a todos los profesores que participaron en mi formación como profesional.

Al profesor Enrique Quispe por su deseo de compartir sus conocimientos y su inmensa paciencia a través de este trabajo.

A mi esposa Janeth y a mi hijo Camilo, por tanto tiempo que no compartí a su lado mientras permitían que me capacitara.

A directivos en SUCROMILES S.A. quienes creyeron en mí, como el doctor Darío Colmenares y el ingeniero Edison Gutiérrez.

## CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	12
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
1. FUNDAMENTOS DE LA GESTIÓN DE ENERGÍA DE MOTORES ELÉCTRICOS	17
1.1 EL CONCEPTO DE EFICIENCIA DE UN MOTOR	17
1.2 NATURALEZA DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE UN MOTOR ELÉCTRICO	18
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA EFICIENCIA Y EL FACTOR DE POTENCIA VS. LA CARGA	22
1.3.1 Factor de potencia	23
1.3.2 Eficiencia	24
1.4 CONSIDERACIONES PARA LA OPERACIÓN ÓPTIMA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN	26
1.4.1 Recomendaciones para ahorrar energía en cargas típicas	28
1.4.2 Red eléctrica adecuada	31
1.5 MOTORES DE ALTA EFICIENCIA	36
1.5.1 Característica de diseño de los motores de alta eficiencia	39
1.5.2 Ventajas, limitaciones y aplicabilidad de los motores de alta eficiencia	41
1.6 SELECCIÓN DE MOTORES A EVALUAR UTILIZANDO EL DIAGRAMA DE PARETO	43

	Pág.
2. EVALUACIÓN EN SITIO DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN	45
2.1 IMPORTANCIA DE LAS EVALUACIONES EN SITIO DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA	45
2.2 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN EN SITIO DE LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA	47
2.2.1 Método de los datos de placa	49
2.2.2 Método del deslizamiento	50
2.2.3 Método estadístico	51
2.2.4 Método del circuito equivalente	51
2.2.5 Método de la Corriente	53
2.2.6 Método de la Estimación de Pérdidas	55
3. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MOTORES PARA LA TOMA DE DECISIONES	57
3.1 EL MÉTODO DEL VALOR PRESENTE PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO	57
3.1.1 El valor del dinero; valor presente	57
3.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE FLUJO DE EFECTIVO	61
3.2.1 Costo de la energía eléctrica que se ahorra	61
3.2.2 Gastos de instalación y mantenimiento	62
3.2.3 Depreciación por la inversión incremental	62
3.2.4 Beneficios antes de impuestos	63
3.2.5 Ganancia después de los impuestos	63

	Pág.
3.2.6 Flujo total de efectivo no descontado	63
3.2.7 Flujo total de efectivo descontado	64
3.2.8 Valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR)	64
3.3 SOFTWARE “EVAMOTOR” PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MOTORES	65
3.4 TOMA DE DECISIONES: Reparar, Reemplazar, Intercambiar, Ratificar	65
3.4.1 En un proyecto nuevo: ¿ comprar un motor estándar ó de alta eficiencia?	66
3.4.2 Cuando un motor falla ¿reparar o reemplazar?	66
3.4.3 Motores poco cargados o sobrecargados ¿ se ratifica ó se cambia?	68
4. TRABAJO DE CAMPO EN LA EMPRESA SUCROMILES S.A.	70
4.1 EQUIPO USADO EN EL TRABAJO DE CAMPO	70
4.2 METODOLOGÍA DE LAS MEDICIONES REALIZADAS	71
4.2.1 Medición para usar el método de la estimación de pérdidas	71
4.2.2 Mediciones para usar el método de la corriente	72
4.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA POTENCIA	77
4.3.1 Ejemplo para el método de la estimación de pérdidas en un motor de 250 HP (Equipo 804P20)	77
4.3.2 Ejemplo para el método de la corriente en un motor de 150HP (Equipo 804P5)	78
4.4 RECOPIACIÓN DE DATOS DE PLACA Y ACTUALIZACIÓN DE BASE DE DATOS	79

	Pág.
4.5 GRUPO DE MOTORES ANALIZADOS	80
5. ANÁLISIS ECONÓMICO ENERGÉTICO DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS SELECCIONADOS EN LA EMPRESA SUCROMILES S.A.	88
5.1 EVALUACIÓN DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE SUCROMILES S.A.	88
5.2 DATOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES	89
5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	98
5.3.1 Motor de 150 HP (Equipo 802P4)	98
5.3.2 Motor de 60 HP (Equipo 803V13)	98
5.3.3. Motor de 60 HP (Equipo 804P12)	99
5.3.4 Motor de 75 HP (Equipo 903P16)	99
5.3.5 Motor de 60 HP (Equipo 903P12)	100
5.3.6 Motor de 100 HP (Equipo 803V18)	100
5.3.7 Motor de 60 HP (Equipo 804P1)	101
5.3.8 Motor de 60 HP (Equipo 804P3)	101
5.4. PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE OPERACIÓN	102
5.4.1 Motor de 150 HP (Equipo 802P4)	102
5.4.2 Motor de 60 HP (Equipo 803V13)	102
5.4.3 Motor de 60 HP (Equipo 804P12)	102
5.4.4 Motor de 75 HP (Equipo 903P16)	102
5.4.5 Motor de 60 HP (Equipo 903P12)	103



	Pág.
5.4.6 Motor de 100 HP (Equipo 803V18)	103
5.4.7 Motor de 60 HP (Equipo 804P1)	103
5.4.8 Motor de 60 HP (Equipo 804P3)	103
6. CONCLUSIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Potencias en un motor eléctrico	18
Figura 2. Partes constitutivas de un motor tipo jaula de ardilla	19
Figura 3. Flujo de energía a través de un motor	20
Figura 4. Potencia, factor de potencia, eficiencia en un motor de 15 HP	25
Figura 5. Factores que influyen en las pérdidas de un motor eléctrico	26
Figura 6. Efectos de la variación de voltaje en un motor	33
Figura 7. Pérdidas de potencia en motores: estándar vs. alta eficiencia	37
Figura 8. Eficiencia vs. potencia en motores estándar y alta eficiencia	38
Figura 9. Eficiencia vs. Carga en motores estándar y alta eficiencia	39
Figura 10. Curvas típicas de eficiencia y carga	49
Figura 11. Impedancias en un motor eléctrico	52
Figura 12. Comportamiento de la corriente de carga	54
Figura 13. Toma de decisiones: reparar o reemplazar	68
Figura 14. Comportamiento de la corriente fase A en el equipo 1003V1	74
Figura 15. Comportamiento de la corriente fase B en el equipo 1003V1	74
Figura 16. Comportamiento de la corriente fase C en el equipo 1003V1	75
Figura 17. Corriente promedio en las tres fases en el equipo 1003V1	76
Figura 18. Diagrama de potencia instalada por área	84
Figura 19. Diagrama de potencia instalada por área funcionando	87
Figura 20. Motor de 150 HP (Equipo 802P4) corriente promedio en las tres fases	90
Figura 21. Motor de 60 HP (Equipo 803V13) corriente promedio en las tres fases	91
Figura 22. Motor de 60 HP (Equipo 804P12) corriente promedio en las tres fases	92
Figura 23. Motor de 75 HP (Equipo 903P16) corriente promedio en las tres fases	93
Figura 24. Motor de 60 HP (Equipo 903P12) corriente promedio en las tres fases	94
Figura 25. Motor de 100 HP (Equipo 803V18) corriente promedio en las tres fases	95
Figura 26. Motor de 60 HP (Equipo 804P1) corriente promedio en las tres fases	96
Figura 27. Motor de 60 HP (Equipo 804P3) corriente promedio en las tres fases	97

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Nombre característico de los motores de alta eficiencia	41
Tabla 2. Evolución del rendimiento en los motores eléctricos (en %)	45
Tabla 3. Eficiencia de motores estándar de 1800 rpm suministrada por los fabricantes (en %)	46
Tabla 4. Eficiencia de motores de alta eficiencia de 1800 rpm suministrada por los fabricantes	46
Tabla 5. Eficiencia en función de la carga del motor (en %)	47
Tabla 6. Eficiencia y factor de potencia en un motor de 30 KW	48
Tabla 7. Eficiencia suministrada de acuerdo al método	50
Tabla 8. Método del valor presente	59
Tabla 9. Obtención del valor real del dinero por el método del valor presente	60
Tabla 10. Datos del equipo 1003V1, usados en los cálculos	77
Tabla 11. Motores mayores o iguales a 50 HP instalados área Servicios	81
Tabla 12. Motores mayores o iguales a 50 HP instalados área Cítrico	82
Tabla 13. Motores mayores o iguales a 50 HP instalados planta Alcoquímica	83
Tabla 14. Potencia nominal instalada por planta	83
Tabla 15. Motores mayores o iguales a 50 HP funcionando área de Servicios	85
Tabla 16. Motores mayores o iguales a 50 HP funcionando planta de Cítrico	86
Tabla 17. Motores mayores o iguales a 50 HP funcionando planta Alcoquímica	86
Tabla 18. Potencia nominal instalada y funcionando por planta	87
Tabla 19. Potencia y eficiencia real en motores área de Servicios	88
Tabla 20. Motores con porcentaje de carga menor al 75%	89
Tabla 21. Datos del equipo 802P4, usados en los cálculos	90
Tabla 22. Datos del equipo 803V13, usados en los cálculos	91
Tabla 23. Datos del equipo 804P12, usados en los cálculos	92
Tabla 24. Datos del equipo 903P16, usados en los cálculos	93
Tabla 25. Datos del equipo 903P12, usados en los cálculos	94
Tabla 26. Datos del equipo 803V18, usados en los cálculos	95
Tabla 27. Datos del equipo 804P1, usados en los cálculos	96
Tabla 28. Datos del equipo 804P3, usados en los cálculos	97

## GLOSARIO

**BANDA DE TOLERANCIA:** voltaje mínimo y máximo tolerado en un motor.

**CORRIENTES PARASITAS:** corrientes eléctricas pequeñas en las láminas de acero del motor debido a la reorientación de las fuerzas magnéticas.

**CORRIENTE NOMINAL:** corriente normal de trabajo del motor a plena carga.

**EFICIENCIA O RENDIMIENTO:** porcentaje de la potencia eléctrica de entrada que es efectivamente convertida en trabajo en el eje del motor.

**FACTOR DE SERVICIO:** cantidad de sobrecarga esperada que puede manejar un motor, excediendo su potencia nominal.

**FACTOR DE POTENCIA:** medida del amperaje magnetizante requerido por un motor específico. Se suministra en porcentaje.

**MOTOR DE INDUCCIÓN:** máquina eléctrica rotativa que convierte energía eléctrica en mecánica o viceversa.

**MOTORES DE ALTA EFICIENCIA:** motores que por su diseño y construcción, reducen los costos de operación a cualquier nivel de carga.

**PAR DE ARRANQUE:** es la fuerza de torsión ejercida por el eje de un motor cuando está energizado a pleno voltaje y con su eje inmovilizado.

**PAR MÍNIMO DE ACELERACIÓN:** el punto mas bajo o mínimo de aceleración de un motor en el proceso de alcanzar la velocidad plena.

**PAR DE DESENGANCHE:** también llamado par máximo; es la cantidad de par disponible desde el eje del motor cuando está operando a pleno voltaje y velocidad plena.

**PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS:** pérdidas de potencia eléctrica resultado de la reorientación constante del campo magnético en las láminas de acero del motor.

**PLACA CARACTERÍSTICA:** información sobre las características mas importantes del motor, la cual es suministrada por el fabricante y pegada en la parte externa del motor.

POLOS: número de polos magnéticos que aparecen en el motor cuando se le aplica energía eléctrica.

POTENCIA ELÉCTRICA: energía eléctrica usada en el funcionamiento del motor.

TORQUE O PAR: fuerza de torsión ejercida por el eje de un motor.

VELOCIDAD DE PLENA CARGA: velocidad aproximada a la que funciona un motor cuando esta produciendo la potencia nominal de plena de salida.

VOLTAJE NOMINAL: es el voltaje para el cual esta diseñado el motor.

## RESÚMEN

En este trabajo se presenta la aplicación de la gestión energética a los motores de la empresa sucromiles. Que consiste en determinar el menor grupo de motores eléctricos trifásicos que consuman la mayor parte de energía utilizada en la empresa. A este grupo de motores se le realizó un estudio de eficiencia energética para estimar la eficiencia y la potencia de estos motores eléctricos con la finalidad de implementar medidas que permitan una operación más eficiente. Como ayuda primordial para este estudio se utilizó un Analizador de Redes Eléctricas, para capturar la información eléctrica necesaria en cada motor.

La evaluación de la potencia del motor permite encontrar si un motor en uso, está trabajando de las 3 siguientes maneras: sobrecargado, sobredimensionado o en el punto óptimo de operación. En cualquiera de los 3 casos hay un costo de operación diferente y solo con el cálculo de la eficiencia de cada uno de los casos se puede realizar un análisis técnico-económico. Se analizaron algunos métodos propuestos para determinar la eficiencia de un motor eléctrico trifásico de inducción en el sitio de trabajo, analizando los fundamentos teóricos de cada método.

También se hizo un estudio sobre los motores eléctricos de inducción de alta eficiencia que tienden a reducir enormemente las pérdidas que se presentan en la transformación de energía eléctrica en energía mecánica en las máquinas rotativas como son los motores eléctricos de inducción.

Para los cálculos económicos se usó el software, "EVAMOTOR" de la Universidad Autónoma de Occidente.

**Palabras claves:** Gestión de la energía, motores eléctricos de inducción, eficiencia energética, métodos, medición en sitio, ahorro de energía eléctrica, motores de alta eficiencia.

## INTRODUCCIÓN

Antecedentes del tema: Dentro de las gestiones de calidad en las empresas, se hace necesario involucrar el concepto de uso eficiente de la energía eléctrica como contribución a la conservación de energía y el medio ambiente. Involucra oportunidades de ahorro importantes, para que las empresas se logren mantener con ganancias sostenibles, por medio de reducción de gastos energéticos y de inversiones no necesarias, aprovechando el recurso que se tiene.

Los motores eléctricos son normalmente convertidores de energía eléctrica en mecánica, con importancia inmensa en los procesos industriales. Aportan al consumo total de energía de las plantas. Tienen asociadas pérdidas en forma de potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía en el motor.

Las pérdidas en los motores eléctricos de inducción, por su naturaleza se pueden clasificar en varias áreas:

- Pérdidas en el cobre del estator.
- Pérdidas en el cobre del rotor.
- Pérdidas en el núcleo.
- Pérdidas por fricción y ventilación.
- Pérdidas adicionales.

Como consecuencia de esta condición, podemos deducir que el incremento en la eficiencia de los motores se logra con la reducción de sus pérdidas. Para reducir las pérdidas en los motores de inducción, se puede recomendar:

- Usar motores de alta eficiencia.
- Ajustar el motor con la carga de trabajo.
- Mejorar el proceso donde el motor realiza el trabajo.
- Mejorar la calidad de energía eléctrica de la red.

La energía eléctrica que se usa en la operación de los motores eléctricos en Sucromiles S.A. constituye el gasto de operación más importante en la estructura de costos. Un análisis que permita evaluar la eficiencia de operación de estos motores y dar alternativas para su operación más económica y óptima, permitiría reducir los costos de operación, obteniendo así, beneficios económicos y por tanto aumentando la competitividad de la empresa en el mercado.

Planteamiento del problema: Sucromiles S.A. es una empresa industrial que tiene a su servicio una gran cantidad de motores eléctricos. Se estima que aproximadamente el 95 % de la energía consumida, es usada en la operación de estos motores. Por lo tanto la eficiencia en la operación de los motores eléctricos,

es un parámetro importante en el uso eficiente de la energía eléctrica y la reducción de los costos de operación.

Este proyecto busca responder las preguntas: ¿Se están usando eficientemente los motores eléctricos en la empresa?, ¿Es posible reducir el consumo de energía eléctrica en la operación de los motores eléctricos?, ¿Que acciones se deben tomar para que se aumente la eficiencia en la operación de los motores eléctricos?

Objetivo general: Analizar el funcionamiento energético de los motores eléctricos de mayor incidencia en el consumo de energía eléctrica, para evaluar la eficiencia actual de operación y proponer medidas de gestión energética que permitan mejorar la eficiencia de operación de estos motores, si el análisis muestra la posibilidad de hacerlo.

Objetivos específicos:

- Auditar el funcionamiento actual de los motores, determinado el grupo de motores de mayor consumo energético.
- Determinar la cargabilidad y la eficiencia de operación del grupo de motores de mayor consumo energético.
- Actualizar alguna información eléctrica en la base de datos de los motores, aprovechando el estudio realizado.
- Recomendar con base en el estudio realizado, los pasos a seguir para obtener beneficios económicos y técnicos para la empresa.



## 1. FUNDAMENTOS DE LA GESTIÓN DE ENERGÍA DE MOTORES ELÉCTRICOS

### 1.1. EL CONCEPTO DE EFICIENCIA DE UN MOTOR

Eficiencia o rendimiento en un motor eléctrico de inducción, son palabras que se refieren a lo mismo y es lo siguiente: El concepto de eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico de inducción es el porcentaje de la potencia de entrada que es efectivamente convertida en trabajo en el eje del motor.

Otra definición de la eficiencia de un motor eléctrico de inducción que con lleva a la misma respuesta es: Eficiencia o rendimiento es el cuociente entre la potencia mecánica de salida del motor y la potencia eléctrica entregada al mismo, siendo las pérdidas la diferencia entre la potencia eléctrica y la mecánica. La potencia eléctrica es medida en Watts o Vatios (w) y es la que entra por los terminales del motor. La potencia mecánica es medida en Watts o vatios y es la que sale por el eje del motor. En modo de formula la eficiencia se puede expresar:

$$EF = \frac{\text{Potencia Mecánica de Salida}}{\text{Potencia Eléctrica de Entrada}}$$

Se puede expresar en porcentaje:

$$EF \% = \frac{\text{Potencia Mecánica de Salida}}{\text{Potencia Eléctrica de Entrada}} \times 100$$

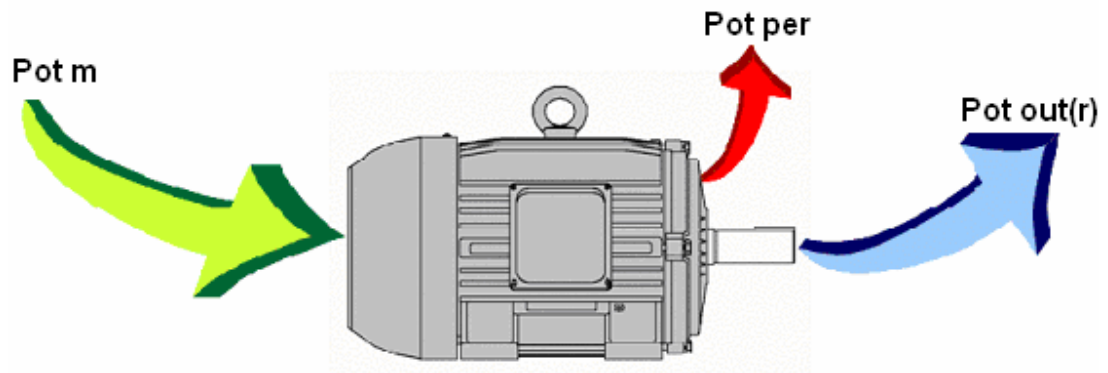
También la podemos expresar como:

$$\text{Potencia Mecánica de Salida} = \text{Potencia Eléctrica de Entrada} - \text{Pérdidas}$$

Entonces se tiene que:

$$EF \% = \left( 1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Potencia Eléctrica de Entrada}} \right) \times 100$$

Figura 1. Potencias en un motor eléctrico



Pot m: Potencia entrada  
Pot per: Potencia perdida  
Pot out(r): Potencia salida

Este valor de la eficiencia esta generalmente indicado en la placa característica del motor, provista por el fabricante.

Para lograr un mejor entendimiento y saber que tan eficiente es un motor eléctrico, se debe conocer el principio de funcionamiento del mismo y detallar cada una de las diferentes pérdidas de energía que ocurren durante la transformación de energía eléctrica en mecánica, en un motor eléctrico.

## 1.2. NATURALEZA DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN UN MOTOR ELÉCTRICO

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica rotativa que tiene la particularidad como todas las máquinas eléctricas rotativas de convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa; eventualmente también pueden transformar energía eléctrica de un tipo en otro aprovechando el movimiento. En las máquinas rotativas hay una parte fija llamada estator y una parte móvil llamada rotor. Normalmente el rotor gira en el interior del estator debido, entre otras cosas, al espacio de aire existente entre ambos y que se denomina entrehierro.

En este interesante proceso de conversión de energía eléctrica a mecánica, se presentan diversas pérdidas de potencia, que ocasionan que no haya una entrega total de la potencia eléctrica convertida en mecánica, es decir, que no es posible tener un tipo de maquina como los motores eléctricos de inducción que reciban el 100% de energía eléctrica y entreguen el mismo 100% en energía mecánica. Esto es lo que hace que el rendimiento o la eficiencia no sea la unidad o el 100%. Las diversas pérdidas en los motores eléctricos, se presentan desde que se energiza un motor, aun trabajando sin carga y las perdidas aumentaran con el aumento de la carga exigida en el motor.

Por ejemplo cuando un motor esta funcionando sin carga en el eje de salida, la energía es usada por el motor para excitar el campo magnético y compensar la fricción de los cojinetes o rodamientos y el llamado “efecto del viento” de la parte giratoria del motor. Entonces podemos decir que la eficiencia sin carga es 0%. En cambio la eficiencia aumenta al aplicarse par (torque) al eje del motor hasta llegar al punto donde la eficiencia se nivela y luego cae desde su máximo nivel. En la mayoría de los motores la eficiencia pico se alcanza entre el 50 y el 100% de la carga nominal. El punto de máxima eficiencia esta determinado por el diseño específico del motor.

Figura 2. Partes constitutivas de un motor de inducción tipo jaula de ardilla

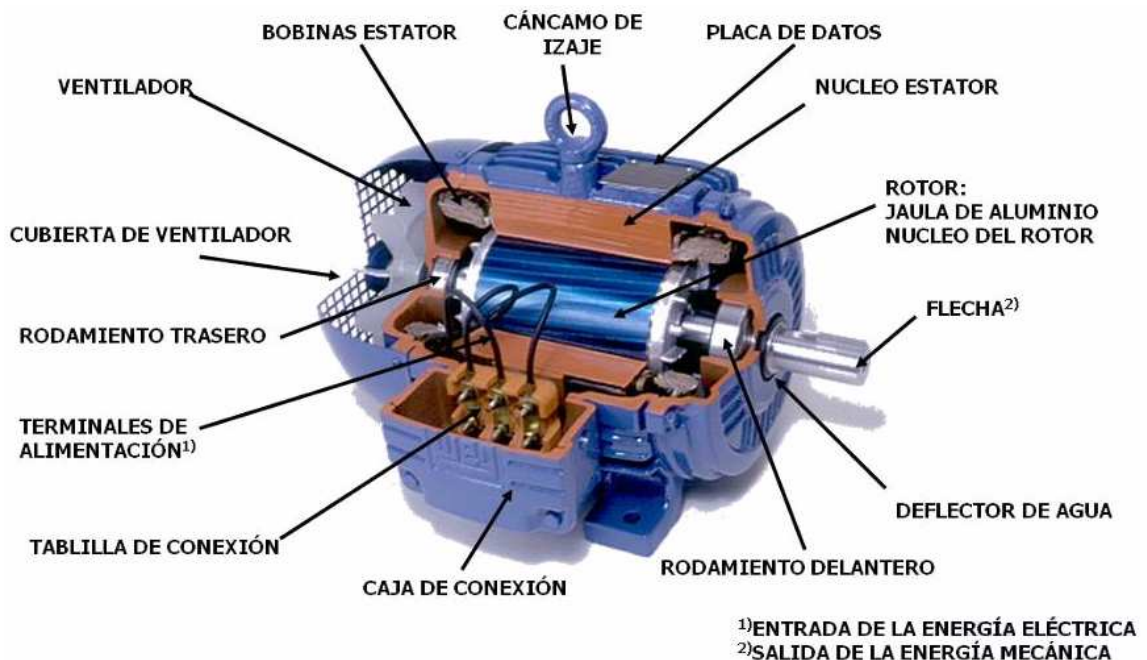
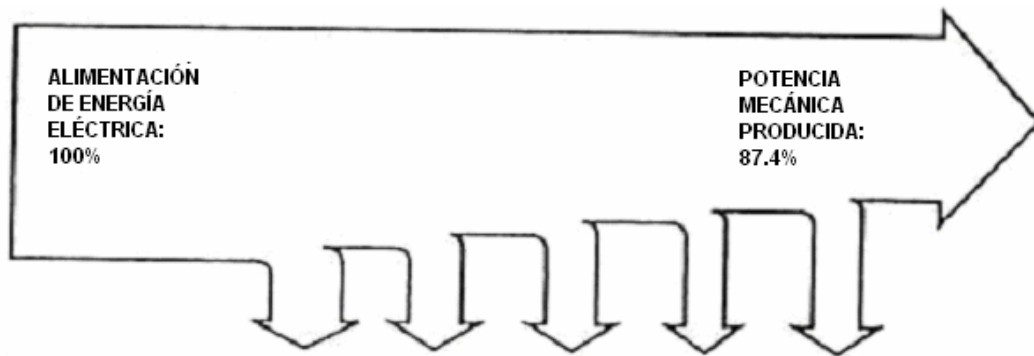


Figura 3. Flujo de energía a través de un motor



	PÉRDIDAS RES. ESTATOR	PÉRDIDAS RES. ROTOR	PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO	PÉRDIDAS POR FRICC. Y VENTIL.	PÉRDIDAS POR DISPERSIÓN	TOTAL
PORCENTAJE DE PÉRDIDAS	30%	20%	19%	13%	18%	100%
PORCENTAJE DE LA ALIMENTACIÓN	3.8%	2.2%	2.4%	1.6%	2.3%	12.6%

Como se puede notar las pérdidas van de mayor a menor y son las siguientes:

**-Pérdida en la resistencia estática:** llamada  $I^2R$  del Estator. Es considerada perdida en los conductores del estator y dependen de la corriente que fluyen en el devanado del estator y la resistencia de ese devanado. Son mínimas en vacío y se incrementan al aumentar la carga.

En función del factor de potencia FP, la corriente de línea en el estator puede expresarse como:

$$I_L = \frac{\text{Potencia eléctrica de entrada}}{\sqrt{3} \times \text{Voltaje de línea} \times FP}$$

Cuando se desea mejorar el comportamiento del motor, es importante notar la interdependencia entre la eficiencia y el factor de potencia. Despejando el factor de potencia la ecuación queda:

$$FP = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} \times \text{Voltaje de línea} \times I_L \times EF}$$

En esta ecuación se nota que si se incrementa la eficiencia, el factor de potencia tiende a decrecer. Para que el FP permanezca constante, la corriente del estator debe reducirse en proporción al aumento de la eficiencia. Cuando se requiere que el factor de potencia mejore, entonces la corriente debe disminuir más de lo que la eficiencia aumente. Desde el punto de vista de diseño no es tan fácil lograrlo debido a que hay que cumplir otras restricciones operacionales como el momento máximo.

Por otra parte la corriente de línea se puede expresar:

$$I_L = \frac{\text{Potencia mecánica de salida}}{\sqrt{3} \times \text{Voltaje de salida} \times FP \times EF}$$

Esta ecuación hace evidente que las pérdidas en el estator son inversamente proporcionales a la multiplicación de la eficiencia y el factor de potencia. Adicionalmente podemos decir que las pérdidas de los conductores del estator dependen de la resistencia del bobinado y es inversamente al peso proporcional del bobinado, es decir que un motor con más material en el estator ocasionará menos pérdidas en el estator.

**-Pérdida en la resistencia rotórica:** Llamada  $I^2R$  del Rotor. También es considerada pérdida los conductores del rotor, cuando son motores con rotor bobinado. Estas pérdidas dependen del cuadrado de la corriente que circula en el bobinado del rotor y dependen del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. Las pérdidas son prácticamente cero en vacío y se incrementan con el cuadrado de la corriente en el rotor y con la temperatura. Las pérdidas en el rotor se pueden expresar en función del deslizamiento:

$$Pérd.Rotor = \frac{(PMS + \text{Pérdidas } F y V)}{1 - S} \times S$$

PMS: Potencia mecánica de salida  
F y V: Fricción y ventilación  
S: Deslizamiento

**-Pérdidas en el núcleo:** resultan de las fuerzas magnéticas cíclicas en el motor y entre ellas tenemos: pérdidas por histéresis debido a la reorientación constante del campo magnético en las laminas de acero del motor y pérdidas por corrientes parasitas que se deben a que la reorientación de las fuerzas magnéticas en el acero produce pequeñas corrientes eléctricas en el mismo. Estas corrientes eléctricas circulan en si mismas y producen calor sin contribuir a la salida de potencia del motor. Tanto las pérdidas por histéresis como por corrientes parasitas ocurren en las partes fijas y giratorias del motor.

**-Pérdidas por fricción:** En este caso debido a los cojinetes o rodamientos. La fricción en los rodamientos es una función de sus dimensiones, de la velocidad, del tipo de rodamiento y de la lubricación usada. Estas pérdidas constituyen un porcentaje pequeño de las pérdidas en el motor

**-Pérdidas por efectos del viento:** Es una combinación de factores, primero cuando el rotor gira el rozamiento con el aire crea cierta resistencia mecánica. Que aumenta a mayor velocidad. También para quitar el calor generado por las diferentes pérdidas, se instala un ventilador en el eje del motor o en los extremos del rotor que proporciona flujo de aire para enfriamiento esto utiliza energía y no aumenta la salida de potencia.

**-Pérdidas por dispersión de carga:** estas son pérdidas no explicadas por las 5 categorías anteriores; pero dependen generalmente de la carga del motor.

### **1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA EFICIENCIA Y EL FACTOR DE POTENCIA VS. LA CARGA**

Poner al servicio un motor eléctrico de inducción tiene un costo de operación, por la energía eléctrica utilizada. ¿Cómo se relaciona la eficiencia, el factor de potencia y la carga o la energía utilizada? Responder a esta pregunta nos puede dar una mejor perspectiva en el conocimiento de los motores eléctricos de inducción.

Para empezar hay que comprender que una cuenta de energía eléctrica ya sea comercial, industrial o residencial, la unidad básica de medida es el kilovatio-hora. Esta es una medida de la cantidad de energía suministrada. Aunque la cuenta de

energía cobra kilovatios- hora; el kilovatio- hora no esta directamente relacionado con los amperios absorbidos por el motor. En ninguna cuenta de cobro aparece la cantidad de amperios utilizados. Así que no necesariamente se paga por amperios. Entendámoslo de la siguiente manera:

**1.3.1 Factor de potencia.** Cuando las cargas son de corriente continua CC y algunas cargas de corriente alterna CA, la formula para calcular la potencia consumida es:

$$\text{Potencia} = \text{corriente} \times \text{tensión}$$

Sin embargo cuando las cargas tienen una característica llamada inductancia, la formula mencionada debe afectarse por un término llamado factor de potencia, así:

$$\text{Potencia} = \text{corriente} \times \text{tensión} \times \text{factor de potencia}$$

Este nuevo termino esta involucrado en las aplicaciones que utilizan energía de CA y donde existen elementos magnéticos inductivos en el circuito. Los elementos inductivos son dispositivos magnéticos tales como: bobinas de solenoide, devanados de motores, devanados de trasformadores, reactores de lámparas fluorescentes.

El flujo de energía en estos dispositivos tiene 2 componentes; una parte es absorbida y utilizada para realizar trabajo útil, esta parte se denomina potencia activa o real. La segunda parte de este flujo de energía se toma a préstamo de la empresa eléctrica y se utiliza para magnetizar la porción magnética del circuito. Esta energía de CA prestada es posteriormente devuelta a la red eléctrica.

Asi que el factor de potencia es una medida de la potencia activa que se utiliza, dividida por el total de la energía, tanto la tomada a préstamo como la utilizada. El rango de valores del factor de potencia es de 0 a 1. Si toda la energía se toma a préstamo y es devuelta sin utilizarla el factor de potencia es 0. Si toda la energía que se toma de la red se utiliza sin devolver nada el factor de potencia es 1.

En los motores eléctricos, el factor de potencia es variable y cambia según la magnitud de la carga que se aplica al motor. Si un motor esta funcionando en vacío, es decir no hay carga aplicada al eje tendrá un muy bajo factor de potencia (aproximadamente 0.1) mientras que un motor funcionando a plena carga tendrá un factor de potencia alto (aproximadamente 0.88)

En conclusión el factor de potencia aumenta con la carga del motor.

**1.3.2. Eficiencia.** La eficiencia es uno de los elementos más críticos en el costo de la operación del motor. Esta es la medida de que también convierte un motor eléctrico en trabajo útil la energía que se está pagando. A hemos mencionado que cierta parte de la energía se pierde y no es recuperable, porque es eliminada en las pérdidas resultantes de la operación del motor. Para recordarlas, son: pérdidas en el cobre, pérdidas en el hierro, pérdidas por fricción y efecto del viento, pérdidas en los cojinetes, etc.

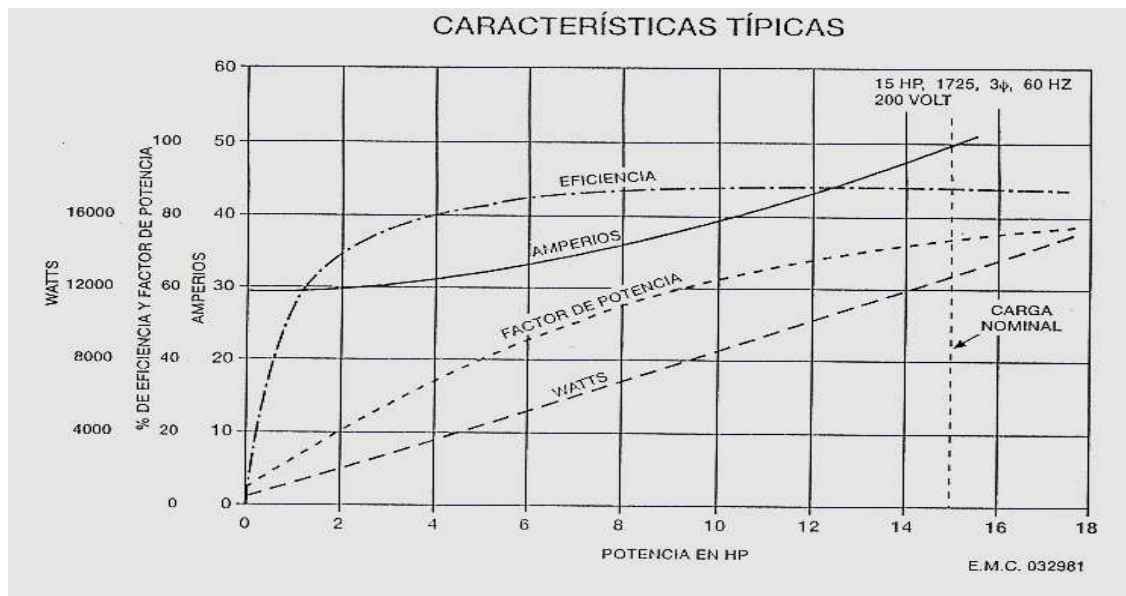
También mencionamos que en un motor de alta eficiencia las pérdidas se reducen, porque se utilizan materiales de mejor calidad, más material y un mejor diseño.

En general, la eficiencia de los motores será relativamente constante entre el 50% y el 100% de su carga nominal.

Cuando hablamos de carga eléctrica, nos referimos a la representación del flujo de corriente eléctrica en el motor. Este flujo incluye la energía tomada a préstamo como la energía utilizada. A bajos niveles de carga, la energía tomada a préstamo es un alto porcentaje de la energía total. Al aumentar la carga en el motor, la energía tomada a préstamo se hace cada vez menor y la energía utilizada es mayor. Es decir que el factor de potencia se va incrementando a medida que aumenta la carga del motor. Al continuar aumentando la carga más allá del 50% de la capacidad nominal del motor, el amperaje empieza a incrementarse en una relación casi rectilínea, como veremos en la figura 4, tomando como ejemplo un motor de 15 HP:



Figura 4. Potencia, factor de potencia, eficiencia en un motor de 15 HP



La figura muestra muy claramente varios elementos importantes que acabamos de explicar, como son la eficiencia, el factor de potencia, los vatios, en relación con la potencia en HP.

El factor mas significativo de todos, corresponde a los vatios requeridos por el motor a diversos niveles de carga, ya que son los vatios quienes determinan el costo de energía eléctrica que se pagará y no el amperaje como pueden pensar algunos.

Un usuario con un factor de potencia muy bajo en el sistema eléctrico total de su planta, puede ser penalizado por la compañía que vende la energía, ya que está tomando prestado una proporción alta de la energía sin pagar por ella. Este cargo se denomina “multa por factor de potencia”.

Una empresa que trabaje con factores de potencia muy altos, no se ve afectada por adiciones de motores pequeños que se incluyan en el proceso, ya que el factor de potencia total de la planta es muy bueno; aunque llega el momento que sumadas todas estas cargas y si no se cuida el rendimiento o eficiencia, harán que baje el factor de potencia. Esto indica la necesidad de mantener una buena eficiencia en los motores eléctricos.

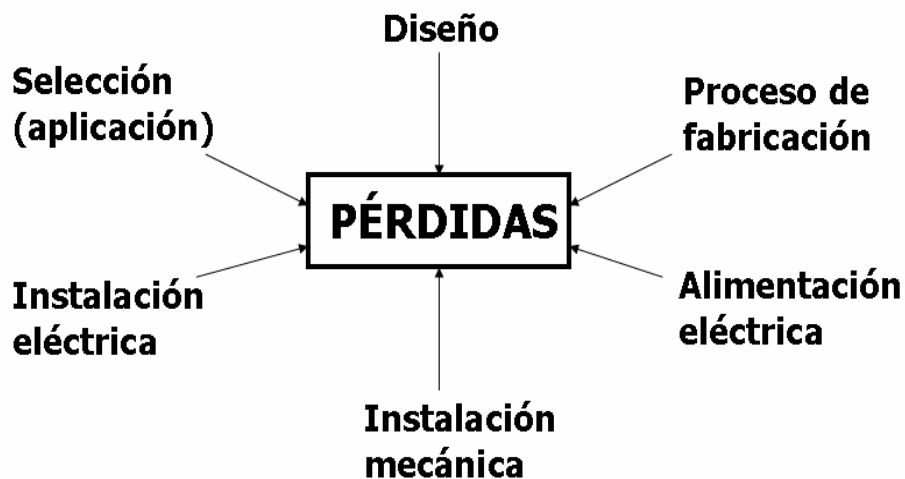
Una buena conclusión a este tema es: Aumentando la eficiencia de los motores se reducirá el consumo de kilovatios-hora y por ende el costo de la energía eléctrica que se paga, sin importar que categoría de usuario sea y sin importar su estructura tarifaria o su factor de potencia específico.

#### **1.4. CONSIDERACIONES PARA LA OPERACIÓN ÓPTIMA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN**

Cuando hablamos de operación óptima en los motores eléctricos de inducción, estamos pensando en motores cuyas pérdidas en el momento de transformación y uso continuo del motor, se vean en un valor reducido, de tal manera que podamos hablar de buena eficiencia o rendimiento en estas máquinas.

Son varios los factores que aportarían a un motor eléctrico de inducción para ser considerado en una aplicación, eficiente. El siguiente cuadro sinóptico nos ayudará a entender que además de las pérdidas eléctricas y mecánicas ocurridas en un motor, también hay que considerar factores externos al motor, que también influyen grandemente en el rendimiento del motor:

Figura 5. Factores que influyen en las pérdidas de un motor eléctrico



La Figura 5 nos ayuda a diferenciar dos cosas importantes; un motor puede ser considerado eficiente o ineficiente, dependiendo de su construcción, es decir, como ya lo hemos mencionado, si es motor de construcción estándar o de alta

eficiencia. No obstante un motor también puede ser considerado eficiente dependiendo del uso al que se ha sometido o al tipo de trabajo que este realizando; pero también otros factores como la instalación eléctrica y la instalación mecánica, serán factores también decisivos en el rendimiento del motor.

Podemos resumir algunos factores importantes demarcados en el cuadro anterior, los cuales serían los más relevantes en la consideración óptima de un motor de inducción, así:

#### DISEÑO:

- ✓ Acero Eléctrico: -Volumen  
-Permeabilidad magnética  
-Diseño de ranuras
- ✓ Bobinados: -Factor de devanado  
-Factor de relleno
- ✓ Mecánico: -Rodamientos y lubricación  
-Ventilador  
-Transferencia de calor  
-Disipación térmica

#### PROCESO DE FABRICACIÓN:

- ✓ Automatización
- ✓ Control de calidad
- ✓ Precisión de maquinados
- ✓ Fundición
- ✓ Balanceo
- ✓ Materia prima

#### ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

- ✓ Calidad en la señal
- ✓ Tensión
- ✓ Frecuencia

#### INSTALACIÓN MECÁNICA

- ✓ Acoplamientos (ajustes)
- ✓ Tensión en bandas

- ✓ Sujeción mecánica
- ✓ Alineación
- ✓ Ventilación

#### INSTALACIÓN ELÉCTRICA:

- ✓ Conexión eléctrica
- ✓ Tierras

#### SELECCIÓN:

- ✓ Nivel de carga
- ✓ Tipo de operación
- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Altitud

De todas las condiciones mencionadas, vamos a considerar algunas que pueden llegar a ser de mucha utilidad en empresas industriales y que algunas veces se pasan por alto al comprar, instalar o cambiar un motor. Estas sugerencias permitirían hacer uso eficiente de un motor eléctrico.

**1.4.1. Recomendaciones para ahorrar energía en cargas típicas.** Las bombas y los ventiladores constituyen más del 55% de las cargas usadas con motores de inducción, por lo tanto lograr que estas operen con la mayor eficiencia posible representa una buena opción para el uso eficiente de la energía; seguidamente se encuentran los ventiladores, sistemas de transmisión y engranajes.

✓ **Bombas.** La gran mayoría de los sistemas de bombeo industrial usan bombas centrífugas. Según el Department of Energy (DOE) de los Estados Unidos, en 1980, 75% de todas las bombas empleadas en los EE.UU. eran de este tipo, y consumían el 90% de la energía de bombeo.

Pueden hacerse dos observaciones generales: Una es que las bombas nuevas adecuadamente diseñadas y fabricadas presentan, en general, eficiencias medias 3-5 puntos porcentuales mayores que las del parque existente; otra es que las bombas nuevas más eficientes tienen eficiencias 3-5 puntos porcentuales mayores que el promedio de las bombas nuevas.

En cuanto a los aspectos económicos, un estudio (DOE, 1980) estimaba que un 20% de incremento en el costo de la bomba atribuible a un diseño más eficiente, se traduce en una mejora de eficiencia de 10 puntos porcentuales en bombas pequeñas (menos de 4 Kw.) y de 2-3 puntos en bombas grandes (más de 40 k.o.).

Algunas de las recomendaciones para mejorar la eficiencia en la aplicación de bombas son:

- Seleccione una bomba eficiente y que opere muy cerca de su altura y flujo de diseño nominal.
- Si la bomba opera muy por debajo de su carga nominal, instale un impulsor más pequeño o ajuste el que existe.
- Tenga en cuenta que en los sistemas de bombas en paralelo agregar mas bombas hace que el sistema sea ineficiente.
- Minimice el número de codos agudos en la tubería.
- Use tuberías de baja fricción y considere cambiar la tubería vieja.
- Realice periódicamente el mantenimiento a las bombas. Sin mantenimiento la eficiencia de la bomba puede caer en 10% respecto al valor de eficiencia nominal.

✓ **Ventiladores.** Típicamente los ventiladores presentan rendimientos de 75% a 80%, ello se debe, entre otras razones, a que los fabricantes han estimado preferible asegurar la confiabilidad de los equipos por sobre la mejora de su eficiencia. Un estudio realizado en Suecia da cuenta de un mayor costo de producción de 15% por concepto de un diseño más eficiente para los ventiladores, para un aumento de eficiencia de 10-20 puntos porcentuales.

Para lograr un ahorro de energía en el uso de los ventiladores se recomienda: Seleccione un ventilador eficiente, realice un mantenimiento regular, por ejemplo limpie regularmente las aspas y mantenga los filtros limpios para reducir las caídas de presión, instale un control para activar el ventilador solo cuando sea necesario, regule el flujo, esto permite una optimización de la presión estática y de ser necesario el redimensione del motor eléctrico.

Solo se usa cuando se tiene espacio suficiente y cuando la velocidad de la carga es la misma a la del eje del motor. La mejor forma de asegurar un correcto acoplamiento es usando la tecnología láser.

✓ **Usando adecuadamente los Sistemas de Transmisión.** Una vez que nos hayamos asegurado que la carga esta siendo usada eficientemente es importante empezar a analizar los sistemas de transmisión. Los sistemas de transmisión son subsistemas motrices que permiten transmitir troqué a otros equipos (bombas, compresores, etc.) ya sea cambiando o no la velocidad que entrega el motor, lo que se logra mediante acoplamientos al eje, engranajes, poleas o cadenas. Es

importante en la selección del sistema de transmisión conocer las características de cada sistema para realizar una adecuada selección.

**Acople directo:** Los acoples directos tienen pérdidas muy reducidas si es que están adecuadamente alineados, un desalineamiento no sólo aumenta las pérdidas sino que además acelera el desgaste de los rodamientos; este tipo de alineamiento solo se usa cuando se tiene espacio suficiente y cuando la velocidad de la carga es la misma a la del eje del motor. La mejor forma de asegurar un correcto acoplamiento es usando la tecnología láser.

**Bandas:** Aproximadamente un 30% de las transmisiones usan bandas. Esta solución presenta una gran flexibilidad de uso y permite aumentar y reducir la velocidad. Los tipos de bandas son: bandas en V, bandas en V dentadas, bandas síncronas (la polea es dentada también) y bandas planas.

Las bandas en V son las más comunes y tienen una eficiencia de 90 a 96%, siendo sus pérdidas principales aquellas vinculadas al doblado y estirado al entrar y salir de la polea, al deslizamiento respecto de la polea y a la fricción. Es importante considerar que el sobredimensionamiento de la bandas produce un aumento de las pérdidas. Por otro lado es importante que las bandas estén adecuadamente tensionadas, si una banda que pertenece a un acoplamiento de bandas múltiples - falla, es mejor reemplazar todas la bandas pues en este caso la diferencia de tensión entre ellas es casi inevitable.

Las bandas dentadas mejoran el rendimiento, respecto de las estándar, en por lo menos 3%, debido a que se requiere menos esfuerzo para doblar y desdoblar la banda al entrar y salir de la polea, y debido a que tienen un menor deslizamiento. Además, las bandas dentadas presentan una mayor vida útil, con lo que se asegura un reemplazo rentable y admiten su instalación en un sistema existente, ya que la polea no cambia. El precio de las bandas dentadas suele ser 20 a 30% superior que aquél de las bandas estándar.

Las más eficientes son las síncronas, que tienen rendimientos de 98% a 99%. En este caso el reacondicionamiento cuesta varias veces más, debido a que se requiere cambiar también la polea.

**Engranajes:** Los engranajes o reductores de velocidad son una de las opciones privilegiadas para cargas que giran a una velocidad inferior a los motores (normalmente bajo 1.200 rpm, aunque también se utilizan para cargas que giran a alta velocidad) y que requieren un alto torque. Los engranajes pueden ser helicoidales, cónicos, cilíndricos y tornillo sin fin. Los engranajes helicoidales y cónicos son usados muy frecuentemente y tienen una eficiencia de 98% por etapa, los engranajes cilíndricos tienen un uso parecido pero pérdidas mayores por lo

que no se recomienda su utilización. Para potencias elevadas se justifica utilizar rodamientos de baja fricción y mejorar los lubricantes de manera de obtener eficiencias de 99% por etapa de reducción.

Los tornillos sin fin permiten reducciones elevadas (5:1 a 70:1), pero la eficiencia es significativamente inferior a los otros tipos de engranajes 55 a algo más de 90%, cayendo bruscamente la eficiencia a medida que aumenta la razón de reducción.

En general, para potencias hasta 15 HP los tornillos sin fin valen más baratos que los helicoidales, por lo que se deben hacer cuidadosos análisis económicos para encontrar la solución ideal (incluso, un rendimiento bajo puede obligar al uso de un motor de mayor potencia). Como en el caso de los motores, la eficiencia cae bruscamente cuando estas transmisiones trabajan bajo 50% de la carga nominal.

Cadenas: Las cadenas, como las bandas síncronas, no tienen deslizamiento. Tradicionalmente las bandas se usan para aplicaciones de alta velocidad y bajo torque. Las cadenas permiten transmitir elevadas cargas que llegan hasta los miles de HP, la eficiencia puede alcanzar a 98%, pero el desgaste le hace perder un par de puntos porcentuales.

**1.4.2. Red eléctrica adecuada.** El efecto del bajo voltaje sobre los motores eléctricos se conoce y entiende bastante bien, pero el efecto del alto voltaje sobre los motores es a menudo mal interpretado. ¿Que se puede esperar en el desempeño de un motor cuando se opere a niveles de tensión diferentes a los nominales?

✓ **Bajo voltaje.** Cuando un motor eléctrico de inducción es sometido a voltaje inferior al del nominal, algunas de sus características van a alterarse levemente y otras se afectaran en forma mas notable. Es claro que para un motor mover una carga acoplada a su eje, necesita cierta cantidad de energía eléctrica que la toma de la red y esta energía depende en gran parte del voltaje y la corriente: es decir, si el voltaje disminuye entonces la corriente aumentará y viceversa para poder mantener la energía requerida para mover la carga. Si la energía aumenta, solo es preocupante en la medida que excedamos la corriente nominal ya que aumentará el calor dentro del motor y puede dañarlo si no se controla debidamente esta situación. Si el motor esta ligeramente cargado y hay una caída de voltaje, la corriente aumentará en la misma proporción aproximada en que se redujo el voltaje. Otro aspecto relevante del bajo voltaje tiene que ver con el par de arranque, par mínimo de aceleración y par de desenganche que varía en función del cuadrado del voltaje que se aplica. Una baja del 10% con respecto al voltaje nominal (Ej.: de 100% a 90%, de 230 voltios a 207 voltios) reducirá el par de

arranque, el par de aceleración y el par de desenganche en un factor de  $0.9 \times 0.9$ , resultando en un 64% de los valores a pleno voltaje. Esto perjudicaría el arranque en motores con “cargas difíciles”

En resumen el bajo voltaje con respecto al nominal en un motor de inducción, puede ocasionar alta corriente, aumentando el calor interno del motor y por tanto disminuyendo la vida útil.

Afecta también el par de arranque, el par mínimo de aceleración y el par de desenganche, sobre todo en motores que tienen acoplados cargas que requieren un par completo para ser movidas.

✓ **Alto voltaje.** Podría pensarse que igual a la anterior explicación, un alto voltaje por encima del nominal haría una disminución de corriente. Esto no es así. El alto voltaje tiende a producir saturación en la parte magnética del motor. Esto hace que el motor consuma excesiva corriente al esforzarse por magnetizar el hierro mas allá del punto en que puede magnetizarse con facilidad.

Aunque los motores toleran cierto aumento de sobrevoltaje al diseñado, un aumento excesivo incrementa la corriente y por tanto la temperatura interna del motor con la consecutiva disminución de la vida útil.

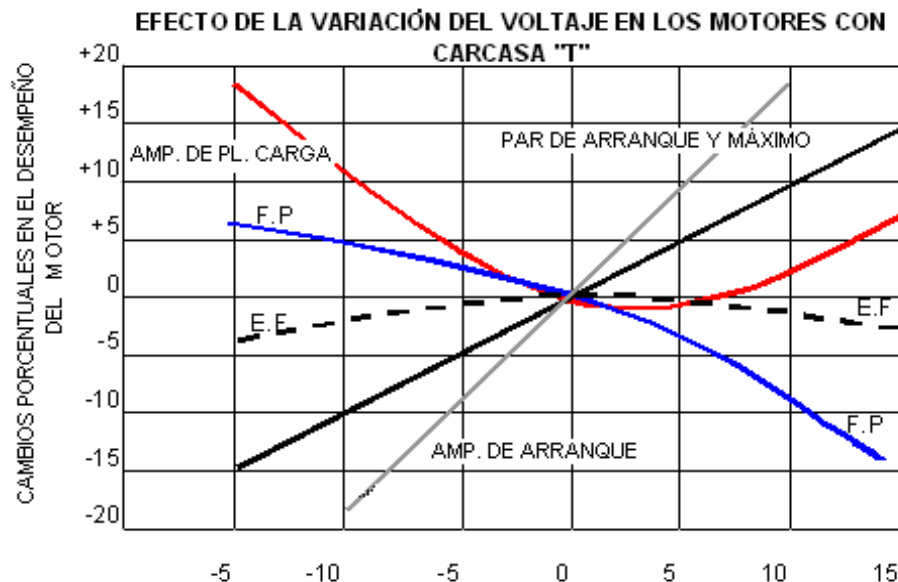
En algunos motores de construcción mas antiguos por ejemplo con voltaje nominal de 220/440 voltios tenían una banda de tolerancia de mas o menos el 10%. Estaríamos hablando de 396 a 484 voltios. Sin embargo el mejor desempeño del motor se lograría a voltaje nominal. En los extremos aunque permitidos el motor esta sometido a un esfuerzo innecesario.

Muy importante lo siguiente: Las bandas de tolerancia no tienen como fin establecer una norma para uso constante, sino determinar un rango que puede utilizarse para acomodar las fluctuaciones normales que se producen habitualmente en la red eléctrica de la planta. La operación continua en el extremo alto o el extremo bajo del rango del voltaje acortará la vida útil del motor.

La Figura 6 ilustra como ejemplo los efectos generales del alto y bajo voltaje en motores con carcasa “T”. Obviamente estas curvas pueden cambiar de acuerdo al diseño del motor.



Figura 6. Efectos de la variación de voltaje en un motor



A continuación se describen algunos principios generales que pueden ser útiles al considerar:

- Los motores pequeños tienden a ser mas sensibles al sobrevoltaje y la saturación que los motores grandes
- Los motores monofásicos tienden a ser mas sensibles al sobrevoltaje que los motores trifásicos
- Los motores de alta eficiencia son menos sensibles al sobrevoltaje que los motores de eficiencia estándar.
- Los motores de dos y cuatro polos tienden a ser menos sensibles al alto voltaje que los diseños de seis y ocho polos
- El sobrevoltaje puede producir aumentos de amperaje y la temperatura incluso en motores con carga ligera. Reduciendo la vida útil del motor
- Es mas peligroso para el motor trabajar a voltaje superior al nominal que si trabajase a bajo voltaje
- La eficiencia a plena carga disminuye ya sea con alto o con bajo voltaje
- El factor de potencia mejora cuando el voltaje es mas bajo. En cambio el factor de potencia decae con el alto voltaje

- La corriente de irrupción aumenta al ser más alto el voltaje.

En conclusión podemos mencionar que los motores eléctricos experimentan muy pocos efectos favorables y si muchos efectos adversos al operar con voltaje diferente al nominal. Los mejores resultados de vida útil y eficiencia operativa en un motor se logran cuando los motores operan con voltajes cercanos al nominal

✓ **Corrientes desequilibradas.** Cuando se detectan corrientes de fase desequilibradas en la alimentación eléctrica de un motor, pueden ocurrir dos preguntas: ¿Hay algo malo en el motor? ¿Cuánto desequilibrio se puede tolerar?

Normalmente los desequilibrios de voltaje en un sistema eléctrico normalmente producen desequilibrios de corriente muchas veces mayores que el porcentaje de desequilibrio en el voltaje. La relación es aproximadamente de 8:1, o sea que un desequilibrio del 1% podría crear corrientes de fase desequilibradas en un 8%.

Ilustremos de una manera no muy científica pero sencilla; Si tenemos un motor cuya corriente nominal es de 10 amperios y esta operando en condiciones equilibradas de alimentación eléctrica y también a plena carga, entonces las corrientes sumadas conjuntamente en las tres fase darían:  $10 + 10 + 10 = 30$  A. Si trabajara en condiciones de alimentación eléctrica desequilibrada y a la misma carga, entonces esperaríamos las corrientes sumadas conjuntamente así:  $10.5 + 11.3 + 12.1 = 33.9$  A. Esto significa que la alta corriente en una de las fases no haría que la corriente en las otras fases disminuyera en igual magnitud. Se puede asegurar que las corrientes desequilibradas siempre resultan en un aumento de temperatura en el interior del motor, lo que equivale a reducción de la vida útil y por ende menor eficiencia. Los problemas de desequilibrio de corrientes en la alimentación eléctrica de un motor pueden provenir del interior del motor o de la red de alimentación.

Problemas en el interior del motor: El desequilibrio ocasionado en el interior del motor puede ser ocasionado por: un número desbalanceado de vueltas en el devanado, un entrehierro disparejo. Es muy ocurente estos problemas especialmente en los motores a los cuales se les ha reparado su bobinado y más aún cuando el problema por el cual fue enviado a reparar fue ocasionado por un corto interno grande, que haya afectado el entrehierro.

Problemas en la alimentación eléctrica: El desequilibrio de corrientes puede ocasionarlo un desequilibrio entre fases y es fácil detectarlo midiendo con un voltímetro entre fases; no obstante esta no es prueba suficiente para decir o afirmar que se deba a un desequilibrio de fase, pues puede que con un voltímetro no se detecten diferencias de fase, porque el desequilibrio de corrientes puede ser

ocasionado por distorsiones en la onda sinusoidal normal de voltaje debido a que hay en la red eléctrica armónicos y se conoce como distorsión armónica.

La distorsión armónica: Puede suceder si hay cargas en zonas vecinas a la conexión del motor que toman corrientes no lineales (ricas en armónicos) del sistema eléctrico. Este inconveniente deforma la onda eléctrica de voltaje, lo que a su vez puede producir corrientes desequilibradas en los motores

Como diferenciar el problema: Se pueden hacer cuatro pruebas cuando hay desequilibrio de corrientes:

- Probar con un voltímetro entre fases de alimentación. Si se observa que hay desequilibrio, apague el motor y vuelva a medir; si el desequilibrio de fases se mantiene, puede indicar que el problema es de la red eléctrica.
- Si el voltímetro en la misma prueba anterior, al apagar el motor indica que el desequilibrio de fase desapareció, entonces el problema puede estar en el interior del motor.
- Al Medir corriente en cada fase y hay presencia de desequilibrio, se pueden invertir las fases en la conexión del motor; si la fase que mostraba el mas alto desequilibrio, sigue mostrándolo, entonces el problema es de la alimentación de la red eléctrica, si por el contrario el desequilibrio de corriente se mueve a otra fase, entonces el problema es del motor.
- Cuando después de hacer las pruebas anteriores y no se observa desequilibrio grande entre voltaje y tampoco muestra problema interno en el motor, entonces el problema es ocasionado por la distorsión armónica en la red eléctrica. Estas pruebas necesitan equipo mas especializado.

La otra pregunta a responder es ¿Cuánto desequilibrio puede tolerarse? Esto dependerá de las condiciones que se encuentren. Si el motor está accionando la carga y el mayor amperaje de los tres ramales es inferior a la corriente nominal a plena carga, la operación del motor es por lo general segura. Si el ramal alto tiene una corriente mayor a la nominal pero esta dentro del amperaje normal correspondiente al factor de servicio (un factor de servicio puede ser 1.15) la operación del motor sigue siendo quizás segura. Se debe tener en cuenta que las mediciones se deben tomar con el motor con carga, pues es aquí donde se nota el mayor desequilibrio.

Importante es considerar el factor de servicio nominal del motor para saber que desequilibrio de corrientes se puede soportar, pero siempre debe tenerse presente, como ya lo habíamos mencionado, que el factor de servicio no es una condición aceptada para trabajo constante del motor, si no para condiciones variables no estables que se presentan en el funcionamiento de un motor.

El ejemplo siguiente nos ayudará a determinar el porcentaje de desequilibrio:

Un motor cuya corriente nominal a plena carga es de 10 A y el factor de servicio es de 1.15. Se toman mediciones de corriente así:

Fase	Amperios
A	10.6
B	9.8
C	10.2

El valor promedio será:

$$\frac{10.6 + 9.8 + 10.2}{3} = 10.2 \text{ A}$$

Diferencia en %:

$$\frac{(\text{Fase más alta} - \text{Valor promedio})}{\text{Valor promedio}} \times 100$$

$$\frac{10.6 - 10.2}{10.2} \times 100 = \frac{0.4}{10.2} \times 100 = 0.039 \times 100 = 3.9\%$$

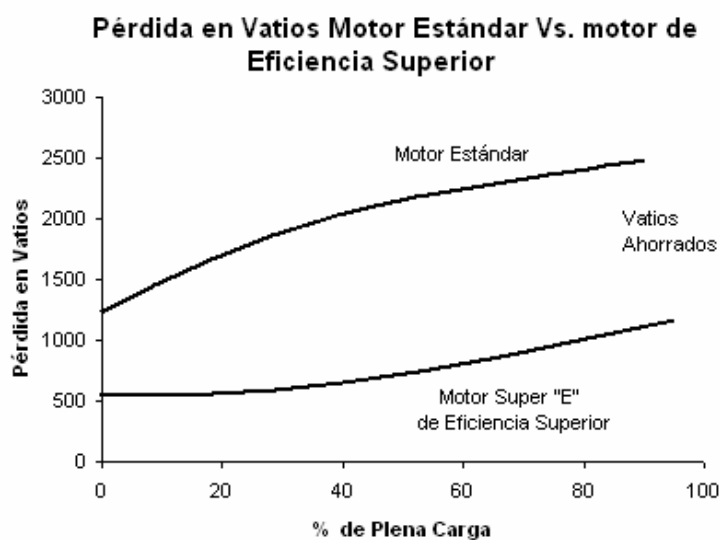
Como conclusión se puede argumentar que las corrientes desequilibradas en los motores trifásicos de inducción son indeseables, pero a veces hay que convivir con ellas y se pueden tolerar si son de poca magnitud. Las corrientes desequilibradas excesivas pueden acortar la vida útil del motor y aumentar el consumo de energía.

## 1.5. MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

No hay una definición básica que pueda describir en pocas palabras que es un motor eléctrico de inducción de alta eficiencia. La definición mas sencilla tiene que ver con lo que se espera en el proceso de conversión de energía presentado en un motor; nos gustaría que hubiera motores que entregaran una eficiencia del 100%, pero el proceso de convertir energía eléctrica en mecánica nunca es

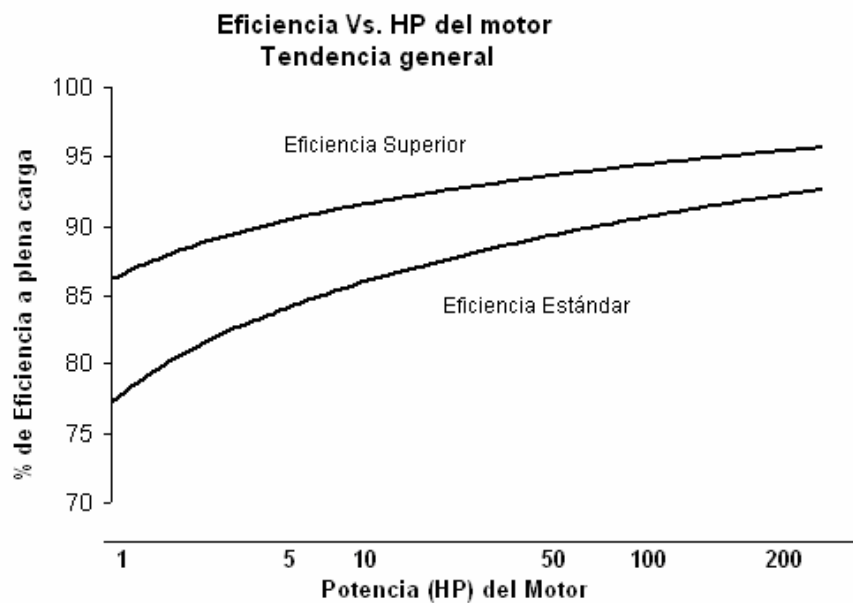
perfecto. Entonces un motor es de alta eficiencia si logra tener un rendimiento cercano al 100%. La Figura 7 muestra las pérdidas de potencia en vatios a diversos niveles de carga en un motor convencional versus las de un motor de eficiencia superior del mismo tipo. Estas curvas cambian notablemente según el tamaño del motor, pero las tendencias son similares.

Figura 7. Pérdidas de potencia en motores: estándar vs. alta eficiencia



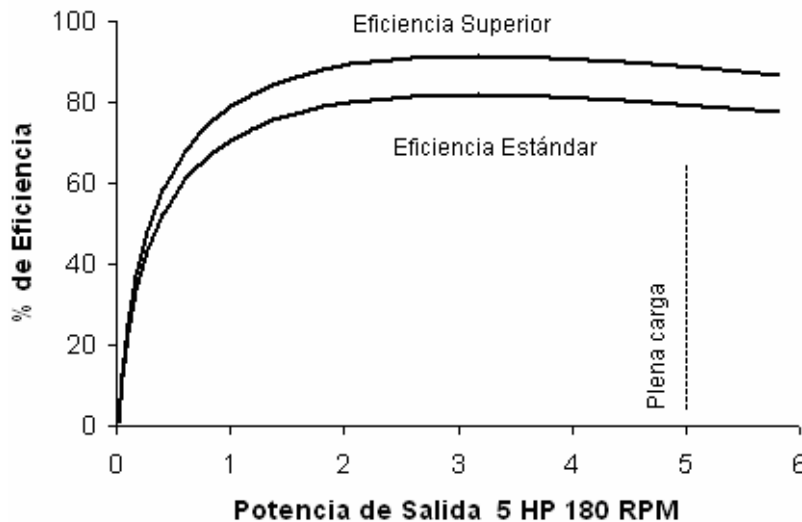
Es imposible construir una máquina que tome 746 vatios de electricidad (1 HP) y los convierta en 1 HP de potencia mecánica. Siempre van a requerirse más de 746 vatios para obtener una potencia de salida de 1 HP. La eficiencia de los motores industriales trifásicos estándar, usualmente varía entre un nivel aproximado de 75% con 1 HP hasta 94% con 200 Hp. La curva de la figura 8 ilustra la tendencia general de la eficiencia v.s el tamaño del motor, para los motores estándar y los de eficiencia superior.

Figura 8. Eficiencia vs. potencia en motores estándar y alta eficiencia



La energía que no entrega el eje del motor se convierte siempre en calor que es necesario quitar de la superficie exterior y las partes internas del motor. Otra complicación es que la eficiencia de los motores eléctricos varia dependiendo de la cantidad de carga del motor. La figura 9 muestra la tendencia general de la eficiencia del motor según la carga respectiva.

Figura 9. Eficiencia vs. Carga en motores estándar y alta eficiencia



La prueba de eficiencia de motores eléctricos reconocida en EUA es la que define la Norma IEEE 112, Método B. En esta prueba el rendimiento del motor se mide con un dinamómetro

Cuando se intenta maximizar la eficiencia de un motor, debe considerarse que ésta pueda incrementarse por dos métodos diferentes. Una posibilidad es seguir el camino en el cual la mejoría se logra fundamentalmente a base de adicionar materiales y empleando tecnologías más costosas. La otra posibilidad es optimizar el diseño del motor utilizando métodos de optimización. La diferencia entre los dos enfoques es que en el primer caso la mejoría se alcanza modificando un diseño existente, mientras que en el segundo caso se obtienen diseños totalmente nuevos.

**1.5.1. Característica de diseño de los motores de alta eficiencia.** Se pueden mencionar las siguientes:

- Las pérdidas en los conductores del estator disminuyen aumentando el área disponible para los conductores mediante la colocación en las ranuras de conductores de más sección o a través de un incremento de las dimensiones de

las ranuras. Una variación en la configuración del devanado puede conducir también a una reducción de estas pérdidas, si se logra disminuir con ello la longitud de las cabezas de bobina y por lo tanto la resistencia del bobinado estático.

- Las pérdidas en los conductores del rotor pueden reducirse incrementando la cantidad del material conductor (en las barras y en los anillos), utilizando materiales de mayor conductividad, así como aumentando el flujo total que atraviesa el entrehierro. La magnitud de estos cambios esta limitada por las siguientes restricciones: momento mínimo de arranque requerido, corriente máxima de arranque permisible y el factor de potencia mínimo aceptable.
- Las pérdidas en el núcleo magnético se reducen haciendo que el motor opere con inducciones mas bajas que las normales y para compensar se incrementando la longitud de la estructura ferromagnética. Esto reduce las pérdidas por unidad de peso, pero debido a que el peso total aumenta, la mejoría en cuanto a pérdidas no es proporcional a la reducción unitaria de estas. La disminución en la carga magnética también reduce la corriente de magnetización; y esto influye positivamente en el factor de potencia.
- Las pérdidas por fricción y ventilación están asociadas a los ventiladores y a la cantidad de ventilación requerida para extraer el calor generado por otras pérdidas en el motor, tal como las pérdidas en el cobre, las del núcleo y las adicionales. Según se reducen las pérdidas que generan calor, es posible reducir el volumen de aire requerido para moverlas y de esta manera, se pueden reducir las pérdidas por ventilación. Esto resulta valido especialmente en el caso de motores cerrados con ventilación externa forzada. Otro camino es el logro de un mejor diseño aerodinámico. Uno de los subproductos importantes de la reducción de las pérdidas de ventilación, es la disminución de los niveles de ruido.
- Las pérdidas adicionales o por dispersión de carga se pueden reducir mediante un diseño optimizado del motor y mediante un proceso cuidadoso de producción. Como estas pérdidas están asociadas al procesamiento, tal como las condiciones superficiales del rotor, se pueden minimizar a través de un control cuidadoso del proceso de fabricación. Las pérdidas adicionales son las más difíciles de controlar en el motor, debido al gran numero de variables que contribuyen a las mismas.

Estas características de mejoramiento en la construcción de los motores eléctricos y que logran maximizar su eficiencia o rendimiento es lo que nos permite identificar los motores de alta eficiencia.

Cada fabricante le pone un nombre característico a su motor de alta eficiencia, para identificarlo de los motores de fabricación estándar que aun siguen saliendo al mercado. En la Tabla 1 muestra los diferentes nombres característicos:



Tabla 1. Nombre característico de los motores de alta eficiencia

FABRICANTE	NOMBRE DEL MOTOR
General Electric	Energy Saver
Reliance Electric Co.	XE Energy Efficient
Baldor Electric Co.	Super E
Magnetek/Louis Allis	Spartan High Efficiency
US Electrical Motors	Corro-DutyPremium Efficiency y World Motor
Siemens	Premium Efficiency
Toshiba	Premium Efficiency

### 1.5.2. Ventajas, limitaciones y aplicabilidad de los motores de alta eficiencia.

✓ **Ventajas.** Se encuentran las siguientes:

- Los motores de alta eficiencia tienden a operar a una menor temperatura en los bobinados, esto aumenta su tiempo de vida. Por ejemplo para los aislamientos clase B o F, una reducción de 10°C en la temperatura de trabajo su vida útil aumenta en aproximadamente dos veces, correspondientemente, el costo total del motor para el usuario disminuye.
- Los motores de alta eficiencia poseen generalmente un menor deslizamiento (mayor velocidad de operación) que los motores de eficiencia estándar, debido a los cambios que se producen en los parámetros del motor. La mayor velocidad puede ser ventajosa en muchos casos, pues mejora la ventilación.
- Los motores de alta eficiencia son normalmente más robustos y mejor contruidos que los motores estándar, lo que traduce en menores gastos en mantenimiento y mayor tiempo de vida.
- El hecho de que se tenga una eficiencia mayor significa que se disminuye los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un

tiempo razonable, sobre todo si se opera a una carga cercana a la potencia nominal. Recuerde que en un año el costo de la energía es aproximadamente seis veces el costo de compra del motor.

✓ **Limitaciones.** Se encuentran las siguientes:

- El hecho de que los motores de alta eficiencia operan a una velocidad mayor, puede ocasionar un incremento en la carga, sobre todo cuando se accionan ventiladores o bombas centrífugas, este hecho debe valorarse en cada situación.
- El momento de arranque y el momento máximo son en algunos diseños ligeramente mayores y en otros ligeramente menores, cuestión que resulte necesario analizar detalladamente en cada aplicación.
- La corriente de arranque suele ser mayor. Esto puede provocar que se sobrepasen los límites máximos de caída de voltaje en la red. También puede influir en la capacidad de los equipos de maniobra, aunque muchas veces se puede operar con los mismos que se usan con los motores estándar y en ocasiones sólo resulta necesario cambiar los elementos térmicos.
- La corriente transitoria en el arranque, que tiene su máximo en el primer medio ciclo, se incrementa debido a la tendencia a un mayor valor de la relación X/R. Aunque esta corriente puede no afectar el tamaño del arrancador, si se afecta el disparo instantáneo del interruptor del motor, por lo que hay que buscar un compromiso entre la coordinación del interruptor y los disparos del arranque.

El factor de potencia del motor puede ser menor que un motor estándar. Un estudio reciente realizado por Bonnett en 1997 [2], encontró que los motores de alta eficiencia construidos en USA, en el intervalo de 3 a 10 HP tienen un factor de potencia mayor que los estándares, inferior en el intervalo de 15 a 40 HP, aproximadamente igual de 50 a 100 HP y de nuevo menor de 125 HP en adelante.

✓ **Aplicabilidad.** Los motores de alta eficiencia pueden aplicarse favorablemente en los siguientes casos:

- Cuando el motor opera a una carga constante y muy cerca del punto de operación nominal.
- Cuando se usan para reemplazar a motores sobredimensionados.
- Cuando se aplican conjuntamente con Variadores electrónicos de frecuencia ( Variable Frequency Drives) para accionar bombas y ventiladores, pueden lograr ahorros de hasta más del 50% de la energía.
- Como parte de un Programa de Uso eficiente de la Energía Eléctrica en instalaciones nuevas.

El ahorro de dinero al aplicar un motor de alta eficiencia se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$S = 0.746 \text{ HP } L C T \left( \frac{100}{EF_A} - \frac{100}{EF_B} \right)$$

- S : Ahorro en pesos por año  
 HP : Potencia de placa en HP  
 L : Porcentaje de carga del motor respecto a la potencia nominal  
 C : Costo de la Energía en pesos por Kwh.  
 T : Tiempo de funcionamiento del motor en horas por año.  
 E<sub>A</sub> : Eficiencia del motor estándar  
 E<sub>B</sub> : Eficiencia del motor de alta eficiencia

Si bien es cierto que los motores eléctricos de alta eficiencia son una alternativa importante para el uso eficiente de la energía eléctrica, su aplicación indiscriminada puede ocasionar la presencia de problemas de arranque o de sobre costo innecesarios. Por lo que es importante conocer sus características electromecánicas, ventajas, limitaciones, para analizar la pertinencia de su aplicación en cada caso. El desconocimiento de las características electromecánicas de los motores de alta eficiencia ha llevado a que los ingenieros y técnicos se formen conceptos errados sobre este tipo de motores, estos conceptos son desmitificados en el Anexo 3 de este artículo.

### 1.5. SELECCIÓN DE MOTORES A EVALUAR UTILIZANDO EL DIAGRAMA DE PARETO

El Diagrama de Pareto consiste en un gráfico de barras similar al histograma que se conjuga con una ojiva o curva de tipo creciente y que representa en forma decreciente el grado de importancia o peso que tienen los diferentes factores que afectan a un proceso, operación o resultado. Obteniéndose lo que hoy se conoce como la regla 80/20. Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema.

- El análisis de Pareto es una técnica que separa los “ Pocos Vitales ” de los “ Muchos Triviales ”.

- Una gráfica de Pareto es utilizada para separar gráficamente los aspectos significativos de un problema desde los triviales, de manera que se sepa donde dirigir los esfuerzos para mejorar.
- Reducir los problemas más significativos (las barras más largas en una Gráfica Pareto) servirá para una mejora general que reducir los más pequeños. Con frecuencia, un aspecto tendrá el 80% de los problemas. En el resto de los casos, entre 2 y 3 aspectos serán responsables por el 80% de los problemas

Pareto es una herramienta de análisis de datos ampliamente utilizada y es por lo tanto útil en la determinación de la causa principal durante un esfuerzo de resolución de problemas. Este permite ver cuáles son los problemas más grandes, permitiéndoles a los grupos establecer prioridades.

## 2. EVALUACIÓN EN SITIO DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

### 2.1. IMPORTANCIA DE LA EVALUACIÓN EN SITIO DE LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA

Los motores eléctricos trifásicos se pueden diferenciar entre ellos, dentro de varias características, cuando consideramos la eficiencia en cada uno de ellos con la cual fueron construidas y cuya eficiencia es suministrada por el fabricante normalmente en la placa característica del motor o en los catálogos suministrados. En estos momentos podemos hablar de motores Estándar y de motores de Alta Eficiencia siendo estos últimos los que entregan una conversión de energía eléctrica a mecánica cercana a la unidad o al 100%.

En las industrias se encuentran motores eléctricos trifásicos que tienen una buena cantidad de años en servicio y que son del tipo de baja eficiencia o estándar; pero también se encuentran una buena cantidad de motores de construcción moderna y con una alta eficiencia.

La Tabla 2 muestra como ha evolucionado con la construcción el rendimiento de los motores eléctricos:

Tabla 2. Evolución del rendimiento en los motores eléctricos (en %)

Potencia en HP	Años				
	<u>1944</u>	<u>1955</u>	<u>1965</u>	<u>1981</u>	<u>1991</u>
7.5	84.5	84.0	87.0	91.0	91.7
15	87.0	88.0	89.5	92.4	93.0
25	89.5	89.0	90.5	93.6	94.1
50	90.5	91.0	91.5	94.1	94.5
75	90.5	91.0	91.5	95.0	95.4
100	91.5	92.0	92.0	95.0	92.2

Obviamente conviene señalar que aunque las distintas normas internacionales distinguen los motores eficientes de los estándar; en general el rendimiento va a depender de los distintos niveles de carga y de la potencia constructiva de cada

motor. También cabe señalar que no existe una norma única que este asociando la potencia de fabricación del motor con una respectiva eficiencia; así hasta dentro de un mismo país diferentes fabricantes pueden construir motores con una igual potencia pero con una eficiencia que pueden diferir en su valor.

A continuación las Tablas 3 y 4 muestran la eficiencia a plena carga suministrada por diferentes fabricantes. La fuente de las tablas es: "American Council for an Energy-Efficient Economy"

Tabla 3. Eficiencia de motores estándar de 1800 rpm suministrada por los fabricantes (en %)

<b>Fabricante</b>	<b>Potencias en HP</b>									
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>
<b>GE</b>	72.0	77.0	80.0	85.5	88.5	88.5	90.2	90.2	91.7	91.7
<b>Lincoln</b>	77.0	80.0	84.0	84.0	85.5	86.5	87.5	91.7	93.0	-
<b>Marathon</b>	77.0	81.6	81.5	85.5	84.0	86.5	88.5	90.2	97.7	93.0
<b>Magnetek</b>	78.5	80.0	81.5	84.0	84.0	86.5	88.5	89.5	92.4	93.0
<b>Reliance</b>	77.0	77.0	80.0	82.5	85.5	86.5	87.5	90.2	90.2	90.2
<b>Toshiba</b>	77.0	80.0	82.5	82.5	86.5	87.5	90.2	91.0	92.4	92.4
<b>US</b>	78.5	85.5	80.0	81.5	84.0	84.0	89.5	91.0	91.0	91.0
<b>Baldor</b>	77.0	78.5	81.5	80.0	84.0	84.0	89.5	93.0	93.0	91.7
<b>Promedio</b>	<b>76.3</b>	<b>78.5</b>	<b>80.6</b>	<b>83.2</b>	<b>85.3</b>	<b>86.3</b>	<b>88.9</b>	<b>90.9</b>	<b>91.6</b>	<b>91.9</b>

Tabla 4. Eficiencia de motores de alta eficiencia de 1800 rpm suministrada por los fabricantes

<b>Fabricante</b>	<b>Potencias en HP</b>									
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>
<b>GE</b>	84.0	84.0	89.5	89.5	91.7	91.7	94.1	94.5	95.4	96.2
<b>Lincoln</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Marathon</b>	82.5	84.0	86.5	86.5	88.5	89.5	92.4	93.0	94.1	94.1
<b>Magnetek</b>	82.5	84.0	89.5	89.5	91.7	91.0	93.6	94.5	95.4	95.4
<b>Reliance</b>	82.5	84.0	87.5	88.5	89.5	90.2	93.0	94.1	95.0	95.4
<b>Toshiba</b>	85.5	86.5	88.5	87.5	90.2	91.0	92.4	93.6	94.5	94.5
<b>US</b>	85.5	85.5	86.5	88.5	89.5	90.2	-	93.6	95.0	95.4
<b>Baldor</b>	82.5	84.0	86.5	87.5	88.5	89.5	92.4	94.1	94.1	94.1
<b>Promedio</b>	<b>83.6</b>	<b>84.6</b>	<b>87.8</b>	<b>88.2</b>	<b>89.9</b>	<b>90.4</b>	<b>93.0</b>	<b>93.9</b>	<b>94.8</b>	<b>94.8</b>

Como ya mencionamos, un factor de suma importancia en el rendimiento con que se usan los motores es el factor de carga, debido a que el rendimiento de estos varía con dicho factor. La Tabla 5 presenta la variación de la eficiencia de un motor con la carga, independientemente de la potencia de los motores, según valores proporcionados en un catalogo de SIEMENS. Este cuadro tiene una validez aproximada que es generalizable, ya que se basa en una distribución porcentual de las pérdidas, la que no cambia mayormente ni por los tipos ni por los tamaños de los motores.

Tabla 5. Eficiencia en función de la carga del motor (en %)

<b>Fc = 0.25</b>	<b>Fc = 0.5</b>	<b>Fc = 0.75</b>	<b>Fc = 1.0</b>	<b>Fc = 1.25</b>
93.0	96.0	97.0	97.0	95.5
92.0	95.0	96.0	96.0	95.5
90.0	93.5	95.0	95.0	94.5
89.0	92.5	94.0	94.0	93.5
88.0	91.5	93.0	93.0	92.5
87.0	91.0	92.0	92.0	91.5
86.0	90.0	91.0	91.0	90.0
85.0	89.0	90.0	90.0	89.0
84.0	88.0	89.0	89.0	88.0
80.0	87.0	88.0	88.0	87.0
79.0	86.0	87.0	87.0	86.0
78.0	85.0	86.0	86.0	85.0
76.0	84.0	85.0	85.0	83.5
74.0	83.0	84.0	84.0	82.5
72.0	82.0	83.0	83.0	81.5
70.0	81.0	82.0	82.0	80.5

La Tabla 5 permite conocer la eficiencia aproximada de un motor para un régimen de carga dado, conocida su eficiencia para otro régimen de carga, independiente de su potencia y si es motor estándar o de alta eficiencia.

Otro aspecto a considerar en un motor eléctrico en funcionamiento, es que el factor de potencia se verá afectado con la eficiencia del motor. Un motor eficiente tiene un mejor factor de potencia. El factor de potencia depende de las distintas condiciones de carga. A continuación la Tabla 6 muestra un ejemplo de un motor de 30 KW del tipo estándar y del tipo eficiente operando ambos bajo cargas variables:

Tabla 6. Eficiencia y factor de potencia en un motor de 30 KW

% carga	Eficiencia %				Factor de potencia			
	100	75	50	25	100	75	50	25
<b>Tipo motor</b>								
Alta eficiencia	93.4	93.9	93.0	91.7	0.882	0.866	0.840	0.693
Estándar	90.9	90.8	89.6	84.4	0.876	0.838	0.766	0.584

Todo esto mencionado nos demuestra que los métodos usados para la medición en sitio de la eficiencia de motores trifásicos de inducción, es supremamente relevante si se quiere determinar la eficiencia “real” de los motores en operación, para realizar un análisis técnico económico.

## 2.2 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN EN SITIO DE LA POTENCIA Y LA EFICIENCIA

Los motores de inducción son los de mas común uso en la industria y por eso a nivel internacional se han desarrollado métodos normalizados para determinar su eficiencia. Algunos métodos son:

- IEEE Std.112-2001, Standard test procedure for polyphase induction motors and generators.
- ANSI/IEEE STD 114-1982, Test procedure for single-phase induction motors.
- CSA 390-98, Energy Efficiency test methods for three-phase induction motors
- NEMA MG-1/2003, Part 12, Motors and generators

Sin embargo estos métodos están orientados a la medición de la eficiencia en el laboratorio donde se encuentran todos los equipos apropiados para realizar las distintas pruebas. Dentro de los análisis hechos en laboratorio se incluyen pruebas como las siguientes:

- Medición de resistencia en frío.
- Prueba de estabilidad térmica
- Determinación de incremento de temperatura.

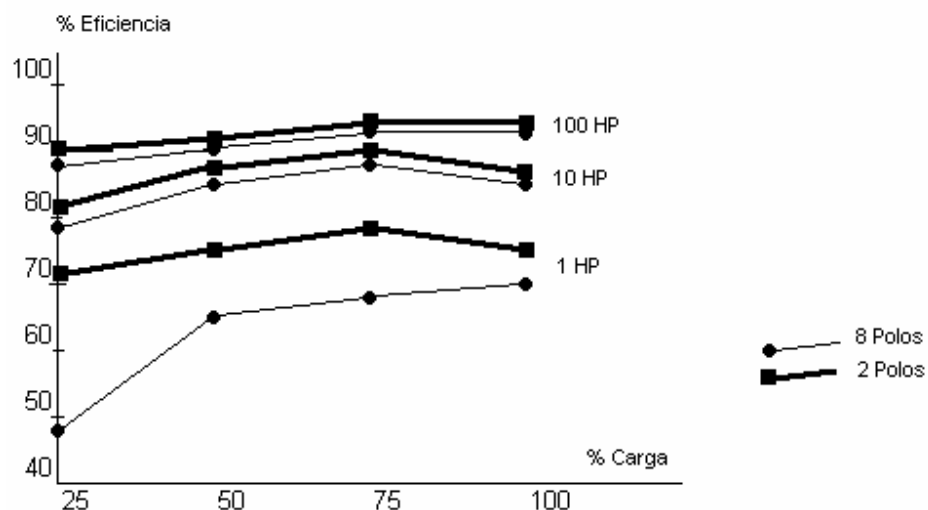


- Determinación de corrección de dinamómetro.
- Pruebas sin carga a diferentes tensiones.
- Prueba a rotor bloqueado a tensión reducida.
- Vibración.
- Medición de ruido.

Por lo que se puede apreciar, estas pruebas no son aplicables para medición en sitio, puesto que en las empresas no se cuenta con las condiciones necesarias para realizar las pruebas bajo dichas normas. Por eso es necesario utilizar métodos sencillos y prácticos para determinar la eficiencia en sitio. Se han desarrollado varios métodos para evaluar la eficiencia en sitio. Entre estos métodos tenemos los siguientes:

**2.2.1 Método de los datos de placa.** Como su nombre lo indica se basa en los datos de la placa característica del motor y aceptamos que la eficiencia es constante a la suministrada en la placa. Este método es aceptable cuando los motores trabajan con una eficiencia cercana al 75% y al observar la curva de eficiencia versus carga, esta es casi aplanada.

Figura 10. Curvas típicas de eficiencia y carga



La gráfica también muestra que la eficiencia en función de la carga en motores de dos y ocho polos no varía considerablemente, cuando se maneja una carga entre el 50 y 100%; pero en mototes de 1Hp y ocho polos, la variación de la eficiencia con la carga es muy evidente.

Podemos concluir que este método es aplicable para algunos tipos de motores, pero impreciso para otros, pues la eficiencia suministrada en la placa puede haber sido determinada por un método diferente al de la norma IEEE; como es el caso de las normas IEC o la JEC. Las diferencias pueden ser tan notorias de acuerdo al método estándar utilizado, como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7. Eficiencia suministrada de acuerdo al método

NORMA	IEEE	JEC	IEC
	112	37	34.2
EFICIENCIA	90.0%	93.1%	92.7%

Otra razón por la cual el método no es tan efectivo tiene que ver con los motores que han sido rebobinados o que se les haya hecho algún trabajo mecánico como metalizado en aje y escudos. En e caso la eficiencia puede reducirse hasta en un 2%.

Otra razón para dudar de su exactitud es si el sistema eléctrico donde esta conectado el motor tiene desbalances de voltaje y corrientes, sometidos a circuitos con armónicos, lo cual es considerado condición anormal y que nos cambia el valor de eficiencia dado en placa.

**2.2.2. Método del deslizamiento.** Aquí se asume que la carga expresada en porcentaje es directamente proporcional a la relación en porcentaje del deslizamiento al valor medido del deslizamiento, sobre el valor del deslizamiento a plena carga. Así entonces se puede determinar la potencia en el eje de salida como:

$$Potencia\ de\ Salida\ en\ el\ eje = \frac{Deslizamiento\ Medido}{Deslizamiento\ Nominal} \times Potencia\ nominal\ de\ salida$$

Para tratar estos valores se usa un tacómetro para medir la velocidad y por norma NEMA se sabe que la variación de velocidad en el motor no debe exceder el 20% de la indicada en la placa del motor. Para este método también deben cumplirse ciertas condiciones de voltaje, frecuencia y carga nominal, incluyendo una temperatura ambiente de 25 grados C. Como no es posible encontrar todas estas condiciones en una empresa industrial, este método también se considera poco exacto.

**2.2.3. Método estadístico.** Este método utiliza formulas empíricas obtenidas en grupos determinados de motores, para estimar la potencia y la eficiencia de dichos motores. Así que su aplicación se restringe únicamente a dicho grupo de motores y no a otros. La aplicación de este método puede tener algunas diferencias significativas cuando se aplican a una misma variable; por ejemplo la determinación de las pérdidas extrañas cuando no es posible medirlas, hay que usar los valores recomendados por las diferentes normas. Por ejemplo la norma NEMA MG1 establece que las perdidas extrañas para motores menores a 2500 Hp., debe asumirse como el 1.2% de la potencia nominal de salida del motor y para motores mayores a 2500 Hp se debe asumir un valor de 0.9%. en la norma IEEE Std 112 se asignan valores para estas perdidas extrañas así:

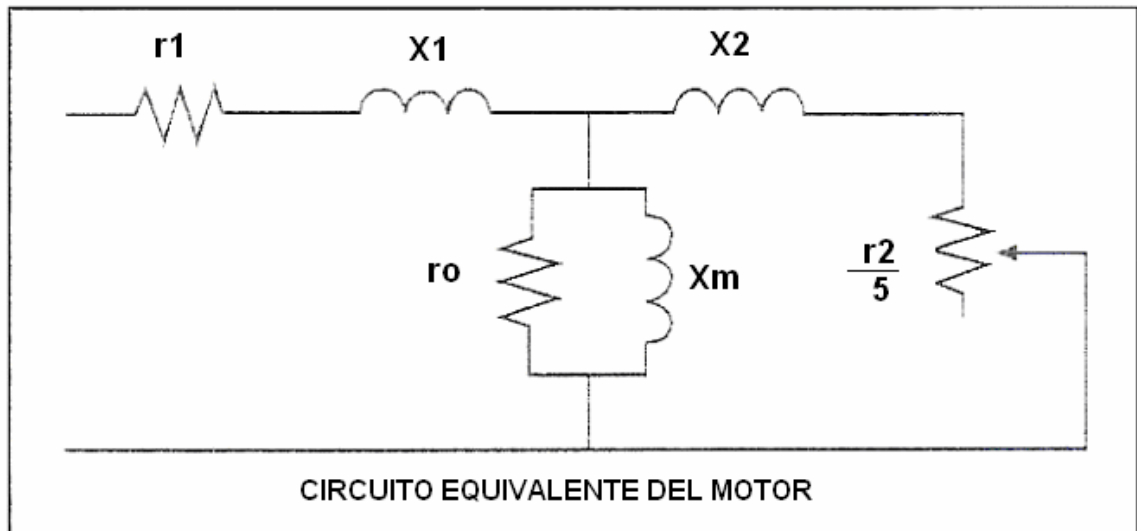
1	- 125 Hp	= 1.8%
126	- 500 Hp	= 1.5%
501	- 2499 Hp	= 1.2%

En normas que no son americanas como la norma IEC 34-2 los valores para las perdidas extrañas pueden ser del orden del 0.5%.

El inconveniente de este método es que no toma en cuenta variables como la elevación de la temperatura en el bobinado. Aunque puede ser utilizado en industrias donde no se puede parar el equipo y desacoplar el motor.

**2.2.4. Método del circuito equivalente.** Podemos desmembrar un motor en seis impedancias como se muestra en la Figura 11:

Figura 11. Impedancias en un motor eléctrico



- r1** = Resistencia del devanado del estator
- X1** = Reactancia de dispersión del estator
- Xm** = Reactancia de magnetización
- ro** = Resistencia de pérdidas en el núcleo
- r2** = Resistencia del rotor
- X2** = Reactancia de dispersión en el rotor

Como se evidencia, el deslizamiento afecta la carga del circuito equivalente del motor. Con este método se puede predecir el comportamiento del mismo para cualquier valor de carga, cuando se conocen los valores de todas las impedancias. Así podemos determinar las pérdidas y obtener la eficiencia. No obstante se debe tener en cuenta que los valores de las impedancias pueden variar mucho entre la condición rotor estático y la condición de operación en vacío de la máquina. Esto se debe al efecto de barra profunda y a la saturación magnética.

El método F1 de la norma IEEE ETD 112, indica como obtener los parámetros de circuito equivalente. Para el cual se requiere realizar pruebas de impedancia, pruebas sin carga y con voltaje variable. Aquí es necesario tomar datos de voltaje, potencia, corriente, temperatura en el devanado del estator o la resistencia del

devanado del estator y también el deslizamiento. Las mediciones se deben realizar a dos valores de voltaje mientras el motor funciona en vacío.

Ya teniendo las mediciones, los parámetros de circuito equivalente se calculan mediante procesos iterativos, para lo cual es necesario tener el dato de  $X_1/X_2$  o en su defecto usar los valores de diseño establecido en la norma NEMA MG1-1993. Así la prueba en vacío proporciona los datos necesarios para determinar la reactancia de magnetización y la resistencia asociada con las pérdidas en el núcleo, la fricción y la ventilación. Para obtener los valores de resistencias y reactancias del estator y el rotor, se hacen pruebas con rotor bloqueado a baja frecuencia. En estas pruebas el valor del deslizamiento es muy importante.

Una muy buena ventaja de este método es la posibilidad de poder estimar la eficiencia del motor bajo condiciones de carga diferentes a las usadas durante las pruebas, lo cual tiene aplicabilidad en las industrias donde los motores pueden funcionar a diferentes cargas. Sin embargo sigue siendo inconveniente el hecho de tener que parar el proceso productivo para tomar todos estos valores.

**2.2.5. Método de la corriente.** Aquí se considera que la potencia de salida del motor es proporcional a la potencia de entrada multiplicada por la relación entre la corriente medida y la corriente a plena carga tomada de los datos de placa, así:

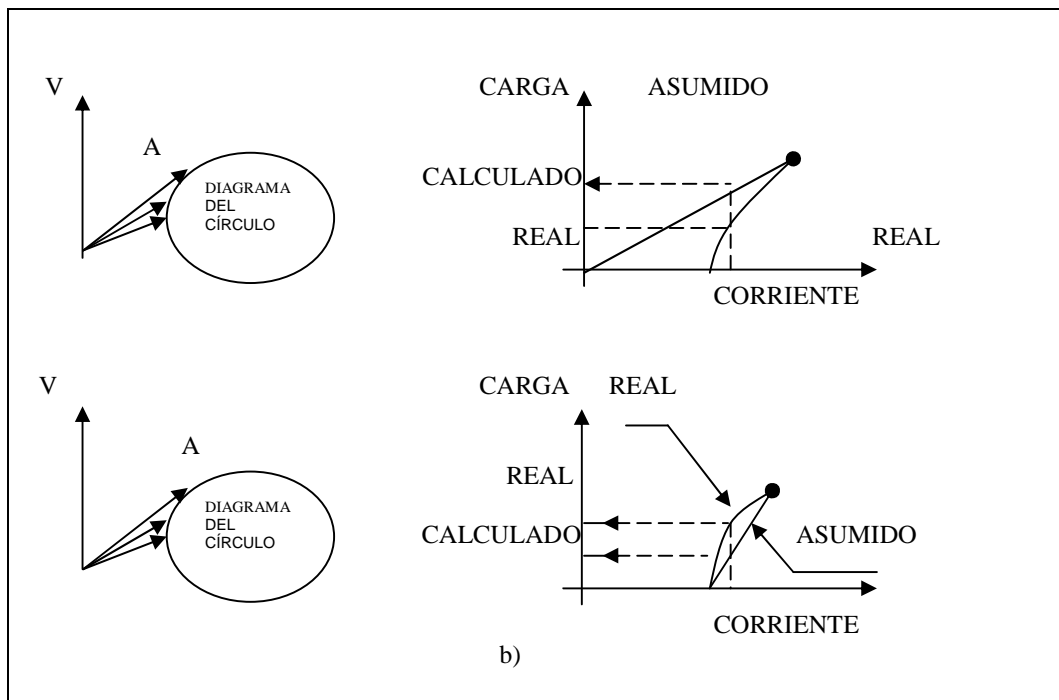
$$Potencia\ de\ Salida\ en\ el\ eje = \frac{Corriente\ Medida}{Corriente\ Nominal} \times Potencia\ nominal\ de\ salida$$

Sin embargo la corriente de carga tiene un comportamiento no lineal sino circular, por lo cual la expresión usada introduce errores en el cálculo final de la eficiencia del motor. Para corregir este inconveniente se hace una variación a la ecuación, usando los valores de corrientes de carga, de vacío y de plena carga. La ecuación quedaría:

$$Potencia\ de\ Salida\ en\ el\ eje = \frac{Corriente\ Medida - Corriente\ Vacío}{Corriente\ Nominal - Corriente\ Vacío} \times Potencia\ nominal\ de\ salida$$

La Figura 12 muestra el comportamiento de la corriente y porque se plantean las dos ecuaciones descritas:

Figura 12. Comportamiento de la corriente de carga



En el primer caso se introduce un error en el cálculo de la potencia de salida, porque el valor real es inferior al valor calculado. En el segundo caso el valor real es mayor que el calculado. Para optimizar el cálculo se propone tomar un valor promedio de los obtenidos por los dos métodos de la corriente.

Un inconveniente para este método es la obtención del valor de corriente de vacío del motor y que los fabricantes no lo entregan en la placa característica del motor ni en sus catálogos. Se puede obtener parando el equipo en el proceso, desacoplarlo de su carga para realizar la medición de corriente en vacío.

**2.2.6. Método de la estimación de pérdidas.** Este método utiliza algunos valores empíricos obtenidos para el manejo de algunas de las pérdidas ocurridas en los motores eléctricos de inducción. Por eso el nombre de Estimación de Pérdidas. El cálculo se realiza siguiendo el siguiente orden aplicando las formulas siguientes y usando los valores empíricos siguientes:

$$P_{fe} + P_{fr \text{ y vent}} = 0.04 \times Pot \text{ m}$$

$$P_{ad \text{ o ext}} = 0.018 \times Pot \text{ n}$$

$$P_{cu(s)} = 3 \times R_m \times (I_m)^2$$

$$Pot \text{ in( r)} = Pot \text{ m} - P_{cu(s)}$$

$P_{fe}$	= Pérdidas en el hierro
$P_{fr \text{ y vent}}$	= Pérdidas por fricción y ventilación
$P_{ad \text{ o ext}}$	= Pérdidas adicionales o extrañas
$P_{cu(s)}$	= Pérdidas en el cobre del estator
$P_{cu(r)}$	= Pérdidas en el cobre del rotor
$P_{totales}$	= Pérdidas totales
$Pot \text{ in(r)}$	= Potencia de entrada al rotor
$Pot \text{ out(r)}$	= Potencia salida en el rotor
$S$	=Deslizamiento
$E_{fic}$	= Eficiencia o rendimiento
$R_m$	= Resistencia medida del bobinado
$R_{LL}$	= Resistencia línea línea
$I_m$	= Corriente medida
$Pot \text{ m}$	= Potencia electrica medida a la entrada del motor
$Pot \text{ n}$	= Potencia nominal del motor
$W_s$	= Velocidad sincrónica
$W_m$	= Velocidad medida

$$S = \frac{W_s - W_m}{W_s}$$

$$\text{Donde } W_s = \frac{120 \times \text{Frecuencia}}{\# \text{ Polos}}$$

$$P_{cu(r)} = S \times Pot \text{ in(r)}$$

$$P_{\text{totales}} = P_{\text{cu(s)}} + P_{\text{fe}} + P_{\text{fr y vent}} + P_{\text{ad o ext}} + P_{\text{cu(r)}}$$

$$P_{\text{ot out(r)}} = P_{\text{ot m}} - P_{\text{totales}}$$

$$E_{\text{fic}} = \frac{P_{\text{ot out(r)}}}{P_{\text{ot out(r)}} + P_{\text{totales}}} \times 100$$

Este método tiene su inconveniente y es el hecho de que se necesita hacer la medición de resistencia del bobinado. Para obtener el valor de la resistencia del bobinado  $R_m$ , se tiene en cuenta el tipo de conexión del motor, si es conexión estrella o conexión triángulo.

Para conexión en triángulo se usa la siguiente fórmula:

$$R_m = \frac{3}{2} \times R_{L-L}$$

Para conexión en estrella se usa la siguiente formula:

$$R_m = \frac{1}{2} \times R_{L-L}$$

Pese al inconveniente de tener que hallar el valor de la resistencia del bobinado, lo que implica tener el motor desenergizado, este método es sencillo por que se tienen valores predeterminados de algunas de las perdidas ocurridas en los motores eléctricos. Es necesario también tomar datos de potencia consumida por el motor y también hacer medición de velocidad del eje con carga.



### 3. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MOTORES PARA LA TOMA DE DECISIONES

Es notorio observar que en las prácticas tradicionales de compra no se evalúa el costo real de la energía, entre otras cosas, porque no se comprende la relación entre la eficiencia y los costos totales durante la vida útil del equipo. Por ejemplo, los compradores se concentran con frecuencia en el bajo costo inicial. No se comprende suficientemente que los motores y accionamientos con mayor eficiencia, aunque son más caros inicialmente, gracias a los costos de operación más bajos compensan la diferencia en un plazo normalmente apropiado.

Por lo anterior cuando se tiene que decidir sobre el motor a seleccionar, es importante considerar que la energía consumida por el motor es un insumo a considerar así como el precio inicial. Por eso cuando se comparan económicamente dos motores de la misma capacidad pero de diferente eficiencia nominal, entonces resulta necesario determinar los ahorros anuales generados por el uso del motor de mayor eficiencia. Las eficiencias usadas para el cálculo deben corresponder con las del motor a las cargas específicas, debido a que la eficiencia varía con la carga, sobre todo para cargas por debajo del 50% la nominal. Es importante en cualquier caso conocer la diferencia de costos de la aplicación que es lo que se tiene que compensar al usar un motor de mayor eficiencia.

Existen algunos métodos para la evaluación económica que se aplican en la selección de motores eléctricos, tales como: Método del precio mas bajo, Método de la recuperación, Método del tiempo de recuperación.

#### 3.1. EL MÉTODO DEL VALOR PRESENTE PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO

**3.1.1. El valor del dinero; valor presente.** Para un cálculo exacto y a largo plazo de la inversión, es indispensable considerar el cambio en el valor del dinero. Es decir se debe de tener en cuenta que si el interés bancario es de un 20%, al cabo de una año el valor del dinero se habrá incrementado a 1.20 veces su valor; a 1.44 veces después de dos años y así sucesivamente. Por lo tanto con el propósito de comparar los resultados a través de distintos períodos de tiempo los gastos e ingresos se convierten usando un estándar para el cálculo llamado *descuento* y que se determina con la ayuda de tablas de interés calculado.

De acuerdo con el método de descuento, una inversión se puede evaluar según lo que vale hoy y el dinero es obtenido a su valor actual y se llama método del valor presente; en este caso, la comparación económica se lleva a cabo al comienzo del período de inversión.

Para calcular el valor presente, se emplea el factor de descuento. Este factor se puede determinar de la siguiente manera:

$$\text{Factor de descuento} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\text{tasa de descuento(interés) en\%}}{100}\right)^{\text{año que transcurre}}}$$

De esta forma, el valor real de dinero ahorrado al finalizar cada año será:

$$\text{Valor real} = \text{ahorro anual} \times \text{factor de descuento}$$

En la tabla 8 se muestra el valor calculado al cabo de 10 años, en el caso de que el ahorro fuese 1000 USD, con una tasa de interés del 20%.

Para el primer año, el factor de descuento será:

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{20}{100}\right)^1} = 0.833$$

y para el segundo año:

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{20}{100}\right)^2} = 0.694$$

y así sucesivamente. El valor real final de ahorro al concluir el décimo año será 4190 USD, según se desprende de la tabla mencionada.

Tabla 8. Método del valor presente

Valor calculado al cabo de 10 años para un ahorro anual de 1000 USD. Tasa de interés: 20%.

Año	Factor de descuento	Ahorro anual (USD)	Valor real (USD)
1	0.833	1000	833
2	0.694	1000	694
3	0.578	1000	578
4	0.482	1000	482
5	0.402	1000	402
6	0.335	1000	335
7	0.279	1000	279
8	0.232	1000	232
9	0.194	1000	194
10	0.161	1000	161
<b>Valor real final:</b>			<b>4190</b>

Este método permite *ahora* saber cuando hay que tomar la decisión y que es *ahora* cuando hay un presupuesto, calculado al valor actual del dinero.

El valor presente para una inversión que se realiza con propósitos de ahorro, se obtiene al multiplicar el valor del ahorro anual por el factor de descuento por intereses y después restarle el costo de la inversión realizada en el presente, esto es:

$$\text{Valor presente} = \text{ahorro anual} \times \text{factor de descuento} - \text{costo de la inversión}$$

Así, si con una inversión de 2500 USD, se logra un ahorro anual de 1000 USD y el dinero se descuenta al 12% de interés para 6 años, esos 1000 USD anuales de ahorro tendrán al final un valor real total de 4112 USD, según se puede observar en la Tabla 9

Tabla 9. Obtención del valor real del dinero por el método del valor presente  
Período considerado: 6 años. Ahorro anual: 1000 USD. Tasa de descuento: 12%

Año	Ahorro (USD)	Factor de descuento	Valor real (USD)
1	1000	0.893	893
2	1000	0.797	797
3	1000	0.712	712
4	1000	0.636	636
5	1000	0.567	567
6	1000	0.507	507
<b>Valor real final:</b>			4112

El factor de descuento para el primer año será:

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{12}{100}\right)^1} = 0.893$$

para el segundo año:

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{12}{100}\right)^2} = 0.797$$

y así sucesivamente. Finalmente, el valor presente al cabo de los 10 años será:

$$\text{Valor presente neto} = 4112 - 2500 = 1612 \text{ USD}$$

Cuando el valor presente (VP) al concluir el período considerado (valor presente neto VPN) es positivo, o sea, cuando la suma total de los beneficios es mayor que el costo de la inversión, la inversión ha sido rentable.

### 3.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE FLUJO DE EFECTIVO

A partir de los principios del método de descuento, se deriva un procedimiento considerado muy eficaz para este tipo de estudio: el *método del análisis de flujo de efectivo*. Las técnicas de flujo de efectivo se basan en el flujo de dinero de año en año, asociado con el costo inicial del equipo y otros gastos, y los ahorros que se obtienen durante la vida útil, tomando en consideración los impuestos, la tasa de descuento, la inflación del costo de la energía y otros factores. El *valor presente neto* (VPN) y la *tasa interna de retorno* (TIR), son dos medidas de flujo de efectivo. Por convención, la ganancia es un flujo de efectivo positivo.

Cuando se comparan dos alternativas de motores con distintas eficiencia se tienen, para un año dado, los siguientes elementos:

Ahorros por el uso de un motor de mayor eficiencia  
- gastos de instalación y mantenimiento  
- depreciación del motor por la inversión incremental  
= beneficios antes de los impuestos

Beneficios antes de los impuestos  
- impuestos (totales)  
= ganancia después de los impuestos (total)

Ganancia después de los impuestos (total)  
+ depreciación del motor por la inversión incremental  
= flujo de efectivo no descontado (total)

Flujo de efectivo no descontado (total) x factor de descuento  
= flujo de efectivo no descontado (total)

Flujo de efectivo descontado (total)  
+ valor presente neto que existía al finalizar el año de anterior  
(para el primer año, se resta la inversión incremental)  
= **valor presente neto (VPN)**

**3.2.1. Costo de la Energía Eléctrica que se Ahorra.** Los ahorros en el Costo Anual de la Energía Consumida (  $C_e$  ) se calculan a partir de la ecuación. Como cada año el costo de la energía eléctrica ( $K_e$ ) estará afectado por la inflación, este será:

$$K_e = C_{ei} (1 + I_{nfl} / 100)^{n-1} \quad (\text{USD} / \text{KwH})$$

donde:

$C_{ei}$  : costo inicial de la energía eléctrica en el primer año (USD/kWh)

$I_{nfl}$  : tasa de inflación anual de la energía eléctrica (%)

$n$  : año que ha transcurrido

Así, el Costo de la energía eléctrica que se ahorra ( $C_e$ ) será:

$$C_e = K_e L(P_{sal}) (12T_o) \left[ \frac{100}{EF_A} - \frac{100}{EF_B} \right] \quad (\text{USD})$$

donde:

$T$  : Tiempo de trabajo mensual del motor (h)

$C$  : Costo de la Energía en pesos por kWh

Cuando hay distintas tarifas horarias o el tiempo de trabajo mensual varía o ambas cosas, es necesario realizar los cálculos para cada variante y después calcular el total.

**3.2.2. Gastos de Instalación y Mantenimiento.** En los análisis diferenciales, sólo se incluyen en el flujo de efectivo las diferencias entre las dos alternativas. Entonces, si al considerarse dos alternativas A y B los costos de instalación y mantenimiento no difieren mucho, éstos pueden dejarse fuera del análisis (el costo diferencial es cero).

**3.2.3. Depreciación por la Inversión Incremental.** La depreciación sobre el incremento de la inversión se resta primero de los ahorros para permitir el cálculo de los beneficios antes de los impuestos y después de se vuelve a sumar para calcular el flujo de efectivo. La depreciación de los motores se considerará lineal. Entonces:

$$D_{ep} = \frac{I_i}{T} \quad (\text{USD})$$

donde  $T$  : vida útil o plazo de servicio de los motores (años)

La depreciación es un gasto virtual que solo se considera para aplicar los impuestos, pues se ha hecho una inversión en comprar los equipos y eso se debe

de descontar para pagar los impuestos. Pero luego se suma a la ganancia después de los impuestos pues es un dinero que no se pierde sino que está invertido en un equipo que produce ganancia.

La depreciación suele dividirse linealmente entre los años de vida útil, pero también puede variarse si se considera por ejemplo si las horas de trabajo del motor son distintas en distintos años. También se llega a acuerdos financieros para considerar más depreciación en los primeros años y así pagar menos impuestos cuando aún no se ha recuperado la inversión.

**3.2.4. Beneficios antes de los Impuestos.** Antes de sacar los impuestos a los beneficios obtenidos por el ahorro de la energía hay que restarle la depreciación, que es un gasto virtual pues solo se considera para aplicar los impuestos, pues se ha hecho una inversión en comprar los equipos y eso se debe de descontar para pagar los impuestos.

De esta forma, sin considerar los impuestos, la magnitud del ahorro neto antes de los impuestos ( $C_{si}$ ) será :

$$C_{si} = C_t - D_{ep} \quad (\text{USD})$$

**3.2.5 Ganancia después de los impuestos.** El ahorro de la energía significara un ahorro de dinero y por lo tanto un aumento de las utilidades, y como las utilidades están sujetas actualmente, en Colombia, a un impuesto del 35%; hay que descontar de las utilidades este impuesto. Pero antes de aplicar el impuesto hay que restarle a las utilidades la depreciación del equipo, porque uno no va a pagar un impuesto que incluya el desembolso que hubo que hacer para poder obtener la ganancia pero al ser la depreciación un gasto virtual, se le vuelve a sumar después, ya que ese no es un dinero perdido.

Así el ahorro neto después de ser incluidos los impuestos vendrá dado por:

$$C_{ci} = C_{si} - \left( \frac{I}{100} \right) C_{si} \quad (\text{USD})$$

donde:

I : valor de los impuestos (%)

**3.2.6 Flujo Total de Efectivo no Descontado.** La magnitud total del valor acumulado al finalizar el año (considerando las ganancias logradas a partir de los ahorros y los desembolsos realizados) sin considerar los descuentos por el pago

de intereses sobre los préstamos, es el flujo total de efectivo no descontado. Este será el ahorro con impuestos (  $C_{ci}$  ) más la depreciación (  $D_{ep}$  ). La depreciación del capital invertido había sido primero restada de los ahorros para permitir el cálculo de los beneficios antes de los impuestos, pero como la depreciación es un gasto virtual (porque en definitiva con el motor que se compra se producen bienes materiales) se resta para sacar los impuestos y después se vuelve a sumar. Entonces la depreciación se vuelve a sumar como un flujo positivo de efectivo de esta forma:

$$F_{nd} = C_{ci} + D_{ep} \quad (\text{USD})$$

**3.2.7 Flujo Total de Efectivo Descontado.** Una vez que se definen los flujos de efectivo para cada año de acuerdo con la vida útil considerada para el motor, ellos se descuentan ó se llevan a valor presente (basado en la tasa de interés) para reflejar su valor real. Para ello hay que multiplicarlos por el factor de descuento ( $F_D$ ), el cual calcula por medio de la expresión:

$$F_D = \frac{1}{(1 + D/100)^n}$$

donde:

D : tasa de descuento ó tasa interés (%),

A partir del factor anterior, el flujo total de efectivo descontado en el año será:

$$F_{des} = F_{nd} F_d \quad (\text{USD})$$

### 3.2.8 Valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR)

El valor presente neto (VPN) al finalizar cada año será el flujo total de efectivo descontado más el valor presente neto que existía al finalizar el año anterior. Para el primer año, el VPN anterior es la inversión realizada (que puede ser considerado el VPN de un año denominado cero y que se toma negativo). De esta forma:

$$VPN = F_{des} + VPN_{-1} \quad (\text{USD})$$

donde:

$VPN_{-1}$  : valor presente neto al finalizar el año anterior (USD).



Cuando se comparan dos alternativas, aquella con el mayor valor calculado de VPN será la mejor. Con el método del VPN, se pueden considerar los valores reales del tiempo de recuperación de la inversión, de la ganancia neta al finalizar la vida útil y permite hacer análisis de sensibilidad para valorar la influencia de distintos factores.

Cuando se hacen análisis diferenciales entre dos alternativas, se puede utilizar ventajosamente la tasa interna de retorno (TIR). El TIR se define como la tasa de descuento o de interés que produce un VPN cero al finalizar la vida útil.

El VPN y el TIR se usan en el desarrollo de distintas metodologías de eficiencia para ayudar a los usuarios a tomar decisiones sólidas.

### **3.3 SOFTWARE “EVAMOTOR” PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MOTORES**

Los fabricantes de Motores Eléctricos han elaborado diversos programas, que son buenas herramientas para seleccionar sus motores; no así, para determinar ahorros de energía. En el mismo sentido algunos fabricantes sobre todo a nivel de bombas centrífugas tienen programas para la selección adecuada de sus bombas; pero no para la evaluación de ahorros de energía y mucho menos económicos.

“EVAMOTOR”, es un software desarrollado en la universidad Autónoma de Occidente de Cali, el cual reúne todos los conceptos y las formulas mencionadas que se usan en la evaluación económica de motores, basándose principalmente en el método de análisis de flujo efectivo. Tiene como objetivo ayudar en la toma de decisiones en las industrias en lo que tiene que ver con motores eléctricos trifásicos de inducción, cuando se piensa cambiar, reparar o invertir en un motor nuevo para un proyecto.

### **3.4. TOMA DE DECISIONES: Reparar, Reemplazar, Intercambiar, Ratificar.**

En cualquier circunstancia técnica en la que se tenga que aplicar motores eléctricos el ingeniero se ve enfrentado a un problema de decisión técnica y económica. Por ejemplo cuando se desea comprar un motor nuevo surge la pregunta ¿es conveniente adquirir un motor estándar ó un motor de alta eficiencia?, ó en el caso en que un motor ha fallado también es necesario decidir sobre si ¿es conveniente reparar el motor ó comprar uno nuevo?, cuando un

motor está poco cargado o sobrecargado ¿Como saber si es necesario cambiarlo?. La decisión debe incluir tanto la evaluación técnica como económica. Consideraremos estas preguntas:

**3.4.1. En un proyecto nuevo: ¿comprar un motor estándar ó de alta eficiencia?** Cuando se considera la posibilidad de compra de un nuevo motor eléctrico, el ingeniero responsable de la decisión debe valorar la rentabilidad económica de pagar un costo adicional por el motor de alta eficiencia frente al ahorro derivado de un menor consumo energético. Un aspecto principal en esta decisión es el tiempo de amortización de la inversión. Normalmente estas iniciativas de ahorro industrial consideran dos o tres años el periodo de tiempo necesario para reintegrar el dinero invertido. Para el especialista el criterio de operación que determina la idoneidad de una u otra elección es el número de horas de trabajo del motor. Los motores escasamente utilizados (por ejemplo, motores de accionamiento de válvulas de control) por baja potencia requerida y/o pocas horas de trabajo no serán candidatos a elegir para ser motores de alta eficiencia. Sin embargo, los que operen de tal forma que determinen un consumo energético elevado serán una buena oportunidad de instalar un motor de alta eficiencia.

Considerando valores medios de carga del motor (75%), de mejora de eficiencia entre el motor estándar y el motor de alta eficiencia (entre el 2% al 5%), de costo de compra del motor, de periodo de amortización de tres años y del precio de la energía, puede indicarse que es interesante la compra de un motor de alta eficiencia en los siguientes casos:

- En los motores entre 10HP y 75HP cuando operan 2500 horas anuales o más.
- En los motores de potencias distintas a las anteriores (pequeños y grandes motores) cuando operan 4500 horas o más.

**3.4.2. Cuando un motor falla ¿Reparar o reemplazar?** Cuando un motor falla se presentan tres alternativas: reparar el motor averiado, comprar un nuevo motor de eficiencia estándar o comprar un nuevo motor de alta eficiencia.

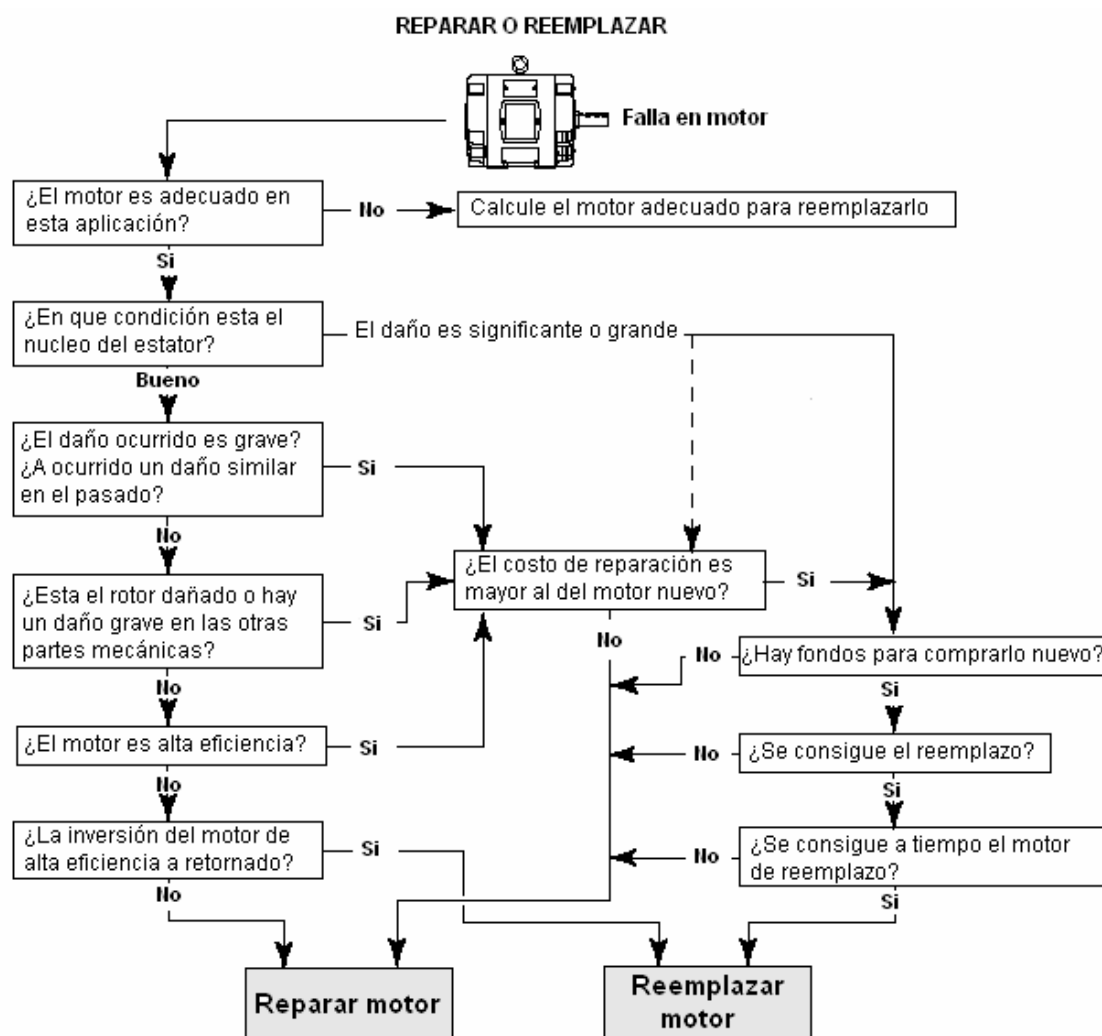
La alternativa de reparación parece ser, a primera vista, la más oportuna por cuanto su costo es inferior a una nueva compra, sin embargo, está constatado que en la mayoría de las ocasiones el rebobinado de un motor conduce a una pérdida de rendimiento, en algunos casos importante, y adicionalmente una menor fiabilidad de funcionamiento, en cuanto que se disipa mayor calor y el motor soportará mayores exigencias. Todas estas variaciones en las pérdidas de potencia del motor son debidas a los calentamientos necesarios para retirar el

bobinado dañado y a errores o modificaciones de dimensionamiento del tamaño del calibre del conductor y de topología del devanado. Estudios de General Electric sobre motores de 3 a 150 HP han determinado que las pérdidas se incrementan un 18%, es decir, que la eficiencia empeora entre 1,5% y 2,5%. La decisión de sustituir el motor averiado por un motor de alta eficiencia es compleja porque depende de varias variables, como el costo de reparación, la variación del rendimiento, el precio del nuevo motor, la eficiencia original del motor instalado, el factor de carga, las horas de operación anuales, el precio de la energía y el criterio de amortización. No obstante, indicaremos algunas claves en esta elección:

- Relacionarse con talleres de reparación calificados para la obtención de información fiable.
- Los motores menores de 40HP y más de 15 años de utilización, o también los motores menores de 15HP, son candidatos a ser reemplazados.
- Si el costo de rebobinado supera el 50% del costo de un motor nuevo, se deberá sustituir por uno nuevo.

El siguiente cuadro puede ayudarnos a tomar una buena decisión cuando el motor en funcionamiento a fallado y se tiene que decidir si es reparación o compra de motor nuevo:

Figura 13. Toma de decisiones: reparar o reemplazar



### 3.4.3. Motores poco cargados o sobrecargados ¿ se ratifica ó se cambia?

Los motores industriales no suelen funcionar a plena carga, pruebas de campo de la California Energy Commission llevadas a cabo en cuatro plantas industriales nos indican que por término medio los motores eléctricos operan al 60% de su carga asignada. Es común que las industrias instalen motores de mayor potencia a la requerida por varias razones prácticas:

- Prevención indirecta de fallos en procesos críticos.
- Desconocimiento de la carga real del motor en la elección de éste.
- Previsión de futuras ampliaciones productivas.
- Por reducciones posteriores de producción.
- Por sustitución de un motor previamente fallido que era de menor potencia.

En cuanto a los motores poco cargados, debe advertirse que no siempre su eficiencia es menor, excepto cuando la carga sea acentuadamente pequeña (menor del 25%) Por ello, cuando la carga supera el 50% no se pueden dar recomendaciones simples de sustitución de éstos motores. En todo caso su factor de potencia es menor y esto afecta a las pérdidas en la distribución eléctrica. Los costos extra indeseables de estos motores son: mayor costo de adquisición del motor y su equipamiento y mayor costo de consumo energético por la reducción de la eficiencia del motor y el sistema eléctrico (factor de potencia). En muchas ocasiones resulta económicamente interesante sustituir un motor poco cargado por un motor de alta eficiencia o incluso por un motor de eficiencia normal.

## **4. TRABAJO DE CAMPO EN LA EMPRESA SUCROMILES S.A.**

### **4.1. EQUIPO USADO EN EL TRABAJO DE CAMPO**

Para el trabajo de campo realizado en la empresa SUCROMILES S.A se usaron elementos de medición proporcionados por la misma empresa, al igual que elementos de seguridad. A continuación describo estos elementos :

- Analizador de Redes Eléctricas, marca CIRCUTOR, modelo AR4-M
- Software para análisis de medición de redes CIR VISION Versión 4.2, CIRCUTOR
- Pinza Volti-amperimétrica, marca KIORITZU, Modelo 2002PA
- Tester Digital marca FLUKE, referencia 110V
- Lámpara Estroboscópica para medir RPM, marca SHIMPO, Modelo DT-311A
- Tacómetro Digital de contacto para medir RPM, marca CHECK-LINE Modelo DT-207B
- Caja de Cadal para verificación de valor de ohmios en instrumentos como la pinza Volti-amperimétrica y el Tester digital, marca LEEDS & NORTHRUP COMPANY USA, Cat. # 4776, serial # 1796696
- Guantes para Alta Tensión,
- Gafas de protección visual
- Casco dieléctrico.
- Calzado especial dieléctrico.

## 4.2 METODOLOGÍA DE LAS MEDICIONES REALIZADAS

Para el trabajo de campo realizado en la empresa SUCROMILES S.A. se usaron dos de los métodos mencionados para evaluar la eficiencia en sitio de los motores eléctricos de inducción a los cuales se decidió hacerle el análisis.

**4.2.1. Mediciones para usar el método de la estimación de pérdidas.** El cual como ya se mencionó utiliza valores empíricos obtenidos para el manejo de algunas de las pérdidas en los motores eléctricos de inducción, pero que necesita de otros valores medidos en el motor, tal como el valor de la resistencia de cada bobina del motor, teniendo muy en cuenta el tipo de conexión, si la medición de ohmios se va a realizar desde el arrancador del motor. Si la medición se hace directamente en la caja de bornes del motor, allí mediríamos el conjunto de bobinas conectadas en serie o triangulo individual por fase. Para este procedimiento es necesario tener el motor fuera de servicio y sin alimentación eléctrica.

Este método se uso para aquellos motores a los cuales no se les fue posible conseguir la corriente de vacío con el fabricante, debido a que son motores de construcción antigua y la información técnica no está disponible. Tampoco se tiene información en la base de datos de mantenimiento de la empresa o la información referente a la corriente de vacío se encontró confusa. Puesto que estos equipos no pueden ser parados eléctricamente cuando se quiera, sino que dependen de la producción continua; se logró hacer la medición de la resistencia del bobinado en un momento donde el equipo paró por fuerza mayor o un mantenimiento del área. Para hacer una aclaración, no fue posible desacoplarlo, lo que también nos había dado la posibilidad de usar el método de la corriente al tomar la corriente de vacío.

En este método también se necesitan otros datos medidos como son: la velocidad del eje del motor a su carga de trabajo máxima y rutinaria y la potencia eléctrica consumida por el motor a dicha carga.

En el caso de la medición de velocidad se usó la lámpara estroboscópica y en algunos casos se pudo comprobar dicha velocidad con el tacómetro digital. En el caso de la medición de potencia eléctrica consumida por el motor, se instaló el analizador de redes CIRCUTOR durante un periodo entre 4 y 18 horas, según la variabilidad de la carga del motor.

En las mediciones para el método de la estimación de pérdidas se tuvieron los siguientes cuidados:

- Para la medición de resistencia óhmica del bobinado de los motores, se logró en algunos casos destapar la caja de bornes del motor, desconectar las líneas del motor que estaban en regleta de conexión y tomar medición de ohmios por cada fase del bobinado.
- En los motores en los cuales no hay bornera o regleta de conexión, y la conexión en la caja de bornes es encintada, no fue posible desconectar dicha conexión debido a que el encintado es costoso y equivaldría a retirarlo y luego poner uno nuevo. Para estos casos se procedió a desconectar las líneas en el arrancador de dos de los motores que prenden con arrancadores suaves, no permitiendo que la medición fuese afectada por alguna impedancia externa. La medición se hizo en la caja de bornes del motor, retirando la mas mínima cinta en la conexión. Luego se reparó nuevamente.
- Para la medición de ohmios se usaron dos multitester a los cuales se les comparó o verificó su medida con una caja de cadal, la cual es un instrumento patrón de valores óhmicos. El uso de dos multitester permite comparar y garantizar que no hayan errores.
- En la medida de rpm se usaron dos equipos con principios diferentes, para garantizar una exactitud. Se usó una lámpara estroboscópica digital y también un tacómetro de contacto digital.
- La medición de rpm tomo en cuenta que la velocidad del eje del motor disminuye con el aumento de carga en él. Para obtener estas velocidades se verificó la con la captura de datos del analizador de redes, en que momentos el equipo toma la mayor corriente de carga. La medición se hizo en un promedio de 20 a 30 minutos. En el caso de los motores con mas variabilidad en la carga, entonces se hicieron mediciones de rpm en varias oportunidades.

**4.2.2. Mediciones para usar el método de la corriente.** Como ya mencionamos este método considera que la potencia de salida es proporcional a la potencia de entrada multiplicada por la relación entre la corriente medida y la corriente a plena carga tomada de los datos de placa.

Un inconveniente para este método es la obtención del valor de corriente de vacío del motor ya que los fabricantes no lo entregan en la placa característica del motor ni en sus catálogos. Se puede obtener parando el equipo en el proceso, desacoplarlo de su carga para balizar la medición de corriente en vacío. Para el caso de la mayoría de los equipos en la empresa, no fue posible, debido a los



procesos de producción y lo que implica desacoplar y luego acoplar, a veces incluyendo alineación mecánica además al motor después de desacoplarlo.

Par el caso SUCROMILES S.A. se obtuvieron varios de los datos solicitando el performance del equipo al fabricante, especialmente en el caso de los motores mas nuevos. En otros casos se pudo obtener el valor de la corriente gracias al historial de mantenimiento con que cuenta la empresa, donde se suministra el dato de la corriente de vacío, cuando el equipo ha estado en reparación y se hacen pruebas y análisis previos a la instalación.

Los demás datos necesarios se obtuvieron de la medición con el analizador de redes CIRCUTOR, el cual se instaló en los equipos por un periodo de 4 a 18 horas, dependiendo de lo variable que pudiera ser la carga acoplada; es decir, los motores que presentan alguna variación de carga notoria durante su funcionamiento rutinario, se les dedicó mas tiempo en la medición, para poder capturar los valores máximos y mas continuos de trabajo del equipo

En las mediciones para el método de la corriente se tuvieron los siguientes cuidados:

- El principal instrumento usado fue el analizador de redes, el cual ofrece muy buenas prestaciones para hacer medición y registro de parámetros eléctricos en redes. Para lo cual se estudió el manual del equipo y hacer un buen estudio en la captura de datos.
- Las mediciones con el analizador de redes se hicieron entre un período de 4 a 18 horas dependiendo de que tan variable es la carga del motor. La instalación del equipo se ajustó en tiempo para cada caso.
- Como el analizador de redes descarga la información en el software CIR VISION versión 4.2, siendo este un software de uso con licencia de la empresa SUCROMILES S.A no es posible usarlo en este documento; pero se pasó a Excel algunos pantallazos de la información que se puede capturar en este equipo con la ayuda del software.

A continuación se muestra la información que se puede capturar con el Analizador de Redes Eléctricas:

Figura 14. Comportamiento de la corriente fase A en el equipo 1003V1

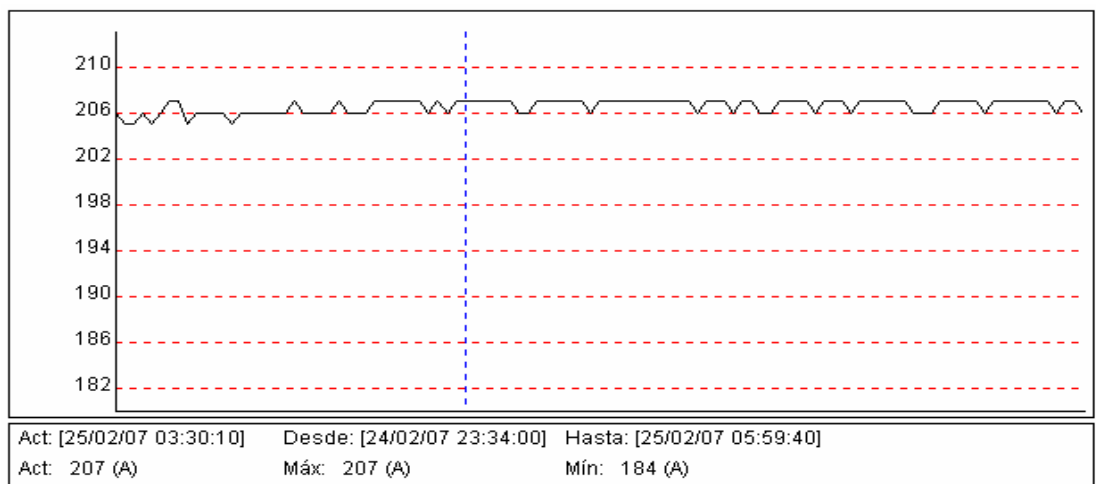


Figura 15. Comportamiento de la corriente fase B en el equipo 1003V1

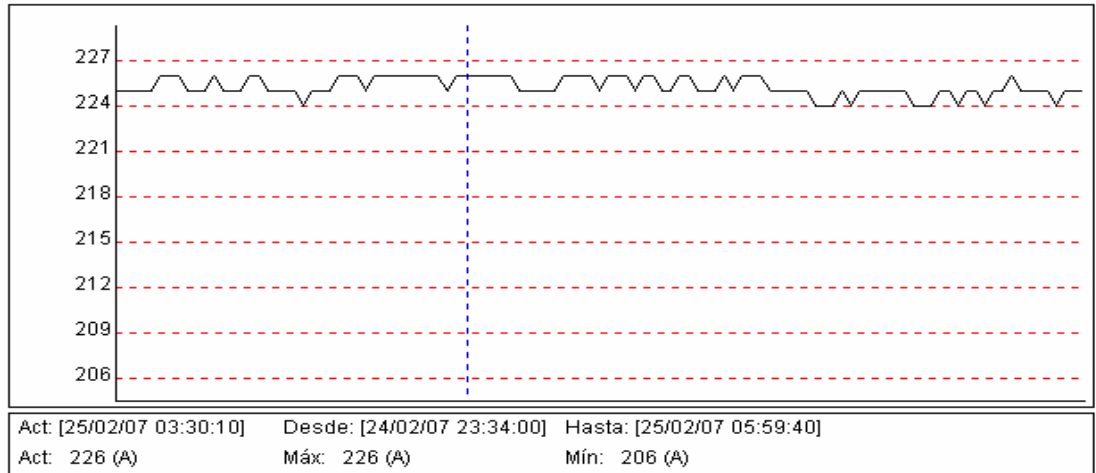
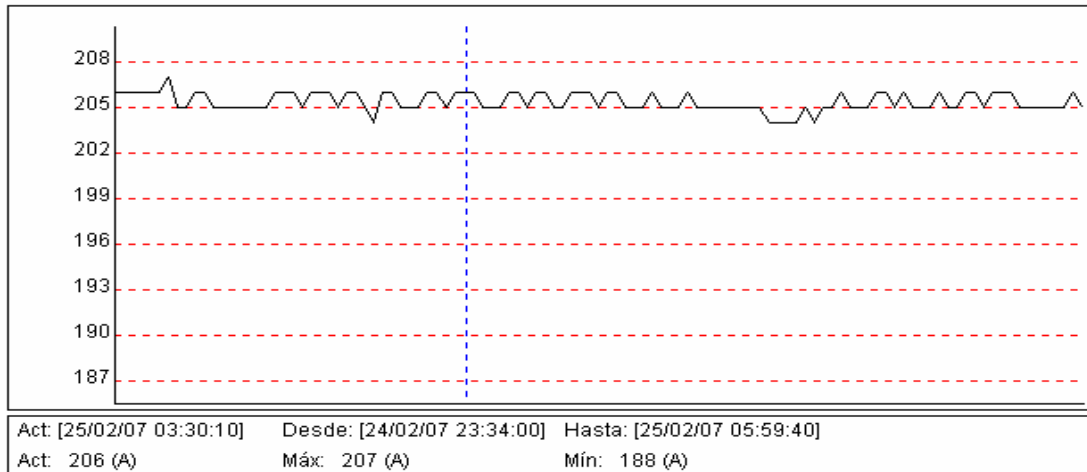


Figura 16. Comportamiento de la corriente fase C en el equipo 1003V1



En los anteriores se puede observar lo siguiente:

- En la parte inferior de cada uno se observa el período durante el cual fue instalado el analizador de redes, lo que equivale al mismo tiempo de captura de datos. En este equipo medido se hizo la captura de datos desde las 23:34 horas hasta las 05:59 horas del día siguiente, lo que equivale a 6.5 horas aproximadamente.

- El gráfico observado para cada una de las fases, es por decirlo así un “pantallazo” del comportamiento de la corriente durante un período de 2.5 horas. El software suministra la información de esta forma, es decir, que no es posible tener un solo gráfico con el comportamiento de una variable durante toda la medición. En este caso se necesitarían tres gráficos seguidos para cada corriente de fase

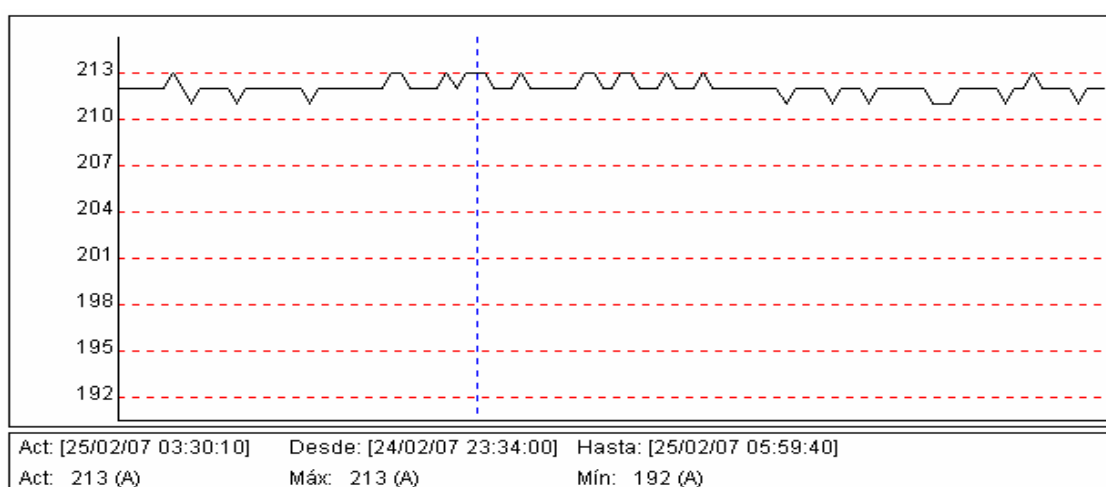
- El gráfico presentado para las tres fases está copiado en el mismo período.

- El gráfico copiado y utilizado en el análisis del comportamiento de la carga en cada motor es el que demuestra lo mejor posible el período máximo durante el cual el motor tomó la mayor carga promediada, que es la que necesitamos para analizar el punto de eficiencia de uso del motor.

- El cursor que se encuentra en cada uno de los gráficos, está en un mismo punto del período para las tres fases, que sería el punto promedio de carga máxima promediada. Este valor se mostrará en la tabla de datos que también se adjunta.

El gráfico siguiente toma las tres corrientes en las tres fases de alimentación al motor y saca un valor promedio de corriente, en el punto de mayor cargabilidad promedio del motor analizado. El cursor muestra el mismo punto horario que en las gráficas de corriente individuales.

Figura 17. Corriente promedio en las tres fases en el equipo 1003V1



La tabla 10 es un resumen de las diferentes variables ocurridas en un punto horario, en este ejemplo es el mismo del que aparece en los gráficos de corriente de cada fase y corriente promediada en las tres fases. El software suministra esta información puntual, de acuerdo al período de toma de datos al cual se configuró en el momento de la instalación. Así que con este programa podemos si lo queremos, obtener unas 400 tablas o más, de datos puntuales de la medición particular de cada motor.

Esta tabla 10 corresponde al punto horario donde se presentó la mayor cargabilidad promedio del motor. De aquí obtenemos el valor de consumo de potencia utilizado en los cálculos para los dos métodos usados en SUCROMILES S.A.

Tabla 10. Datos del equipo 1003V1, usados en los cálculos

Fecha: 25/02/07 03:30:10		Periodo: 0:02:10			
	L1	L2	L3	III	
Tensión (V)	453	454	451	452	
Tensión Máx. (V)	456	458	455		
Tensión Mín. (V)	449	451	449		
Corriente (A)	207	226	206	213	
Corriente Máx. (A)	208	228	208		
Corriente Mín. (A)	206	224	205		
Potencia (W)	42145	44671	39369	126185	
P. Reactiva L (var)	33757	39327	36947	110031	
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0	
F. Potencia	0.78	0.75	0.72	0.75	
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)
Energía	502611.288		443248.322		0.000
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	16	DC 2	11

#### 4.3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA Y LA POTENCIA

Para explicar la metodología usada en cada método, para el cálculo de la eficiencia real de los motores mayores o iguales a 50 Hp en la empresa SUCROMILES S.A, se mostrará un ejemplo por método:

##### 4.3.1. Ejemplo para método de la estimación de pérdidas en el equipo 804P20.

Características del motor:

Marca: Siemens

Potencia nominal = Pot n = 275 Hp = 205150 Vatios

Corriente nominal = In = 323.1 A

RPM nominal = Wn = 1783

RPM medida = Wm = 1785.8

Resistencia en cada bobina = Rm = 0.09 ohmios

Potencia entrada medida = Pot m = 200026 Vatios

Corriente medida = Im = 285 A

$$P_{fe} + P_{fr y vent} = 0.04 \times Pot_m = 0.04 \times 200026 = 8001.04 \text{ Vatios}$$

$$P_{ad o ext} = 0.018 \times Pot_n = 0.018 \times 0.018 \times 205150 = 3692.7 \text{ Vatios}$$

$$P_{cu(s)} = 3 \times R_m \times (I_m)^2 = 3 \times 0.09 \times (285)^2 = 21930.75 \text{ Vatios}$$

$$Pot_{in(r)} = Pot_m - P_{cu(s)} = 200026 - 21930.75 = 178095.25 \text{ Vatios}$$

$$S = \frac{W_s - W_m}{W_s} = \frac{1800 - 1785.8}{1800} = 0.00788$$

$$\text{Donde } W_s = \frac{120 \times \text{Frecuencia}}{\# \text{ Polos}} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ RPM}$$

$$P_{cu(r)} = S \times Pot_{in(r)} = 0.00788 \times 178095.25 = 1404.97 \text{ Vatios}$$

$$\begin{aligned} P_{totales} &= P_{cu(s)} + P_{fe} + P_{fr y vent} + P_{ad o ext} + P_{cu(r)} \\ &= 21930.75 + 8001.04 + 3692.7 + 1404.97 = 35029.46 \text{ Vatios} \end{aligned}$$

$$Pot_{out(r)} = Pot_m - P_{totales} = 200026 - 35029.46 = 164996.54 \text{ Vatios}$$

$$Efic = \frac{Pot_{out(r)}}{Pot_{out(r)} + P_{totales}} \times 100 = \frac{164996.54}{164996.54 + 35029.46}$$

$$= 82.48\%$$

#### 4.3.2. Ejemplo para método de la corriente en el equipo 804P5.

Características del motor:

Marca: US Motors

Potencia nominal = Pot n = 150 HP = 111900 Vatios  
 Potencia medida = Pot m = 143.8 HP = 107276 Vatios  
 Corriente nominal = In = 171 A  
 Corriente medida = Im = 150 A  
 Corriente de vacío = Io = 49.5 A

$$\text{Pot out(r)} = \frac{I_m}{I_n} \times \text{Pot n} = \frac{150}{171} \times 111900 = 98157.885 \text{ Vatios}$$

$$\text{Pot out(r)} = \frac{I_m - I_o}{I_n - I_o} \times \text{Pot n} = \frac{150 - 49.5}{171 - 49.5} \times 111900 = 92559.565 \text{ Vatios}$$

$$\text{Valor promedio de Pot out(r)} = \frac{98157.885 + 92559.565}{2} = 95658.565 \text{ Vatios}$$

$$\text{Efic} = \frac{\text{Pot out(r)}}{\text{Pot m}} \times 100 = \frac{95658.565}{107276} \times 100 = \mathbf{89.17\%}$$

#### 4.4. RECOPIACIÓN DE DATOS DE PLACA Y ACTUALIZACIÓN DE BASE DE DATOS

En todos los equipos a los cuales se auditó y realizó mediciones para el cálculo de su eficiencia, se les tomó la placa característica completa, la cual fue comparada con la base de datos que hay en la empresa SUCROMILES, en el software JD EDWARDS.

Algunos de los datos comparados ya existían y se logró corroborarlos. Otros datos estaban incompletos y se logró actualizarlos. Otros datos no existían y se adicionaron al historial del equipo.

En el caso de la corriente de vacío que se logro consultar y en otros casos, solicitar a los fabricantes de los motores y la cual no viene expresada en la placa característica de los motores, se adicionó al los datos técnicos del historial de los motores.

#### **4.5. GRUPO DE MOTORES ANALIZADOS**

En el trabajo desarrollado en la empresa SUCROMILES S.A. y por solicitud del comité de uso racional de energía de la empresa, los motores de interés a los cuales desean conocerle su eficiencia actual y real, son los motores iguales y mayores a 50 HP, por ser los motores que consumen el mayor porcentaje de energía eléctrica, determinado en estudios por el comité. Por eso en este caso particular no se usó la ayuda del diagrama de Pareto debido a que no resultaría funcional para determinar los motores a analizar. Para cumplir con la solicitud, se procede de la siguiente forma:

En la empresa SUCROMILES S.A Los motores iguales y mayores a 50 Hp se encuentran en diferentes áreas. Las áreas se distinguen dentro de la empresa así::

Planta de Cítrico.

Planta de Alcoquímica.

Área de servicios.

A continuación mostramos en forma de tabla, la cantidad de potencia instalada por área correspondiente a los motores iguales o mayores a 50 HP instalados. Se describe para cada motor, el nombre del equipo, la cedulación interna en la empresa y la potencia nominal de placa:



Tabla 11. Motores mayores o iguales a 50 HP instalados área Servicios

**MOTORES  $\geq$  50 HP SERVICIOS  
INSTALADOS**

<b>Equipo</b>	<b>Cédula</b>	<b>Potencia</b>
Pozo 7	M1182	150
903P7	M1348	50
903P12	M0140	60
903P13	M1347	60
903P16	M0666	75
Pozo 4	M0544	100
Pozo 5	M0200	150
Pozo 6	M0699	200
803V13	M1333	60
803V14	M0801	125
804P19	M1194	275
804P20	M1193	275
803V6	M1334	60
803V9	M1350	60
803V18	M1196	100
804P3	M0518	60
804P5	M1338	150
804P1	M0527	60
804P10	M1339	150
804P12	M1331	60
804P14	M0517	60
802P4	M0334	150
903P15	M1340	75
903P14	M0973	60
804P9	M0521	150
804P8	M1335	150
804P7	M0335	150
804P6	M1342	150
804P2	M0542	60
804P13	M1332	60
804P11	M1344	150
802P5	M1345	150
1403V9	M0691	60
13V3	M0921	60
13V2	M0922	60
13V1	M0923	60
804P15	M0090	150
804P16	M0096	150
804P17	M1158	150
804P18	M1159	150
803V17	M1161	60
1403V13	M0247	100
1403V15	M1366	100
	<b>TOTAL</b>	<b>4745</b>

Tabla 12. Motores mayores o iguales a 50 HP instalados área Cítrico

**MOTORES  $\geq$  50 HP  
INSTALADOS**

**PLANTA DE CÍTRICO**

<b>Equipo</b>	<b>Cédula</b>	<b>Potencia</b>
6V14	M0888	50
6V28	M0889	50
VENT. CITRATO N.I		50
6V15	M0844	60
6V18	M0842	60
5V4	M1250	75
6V30	M0850	75
7P21	M1200	75
6V11	M0887	100
05-4V2	M0668	100
05-4V3	M0987	100
1007V3	M1113	100
6V12	M1054	100,5
5V3	M1082	125
6V32	M0095	125
1203V1	M0322	150
1203V2	M0725	150
1203V3	M0101	150
1203V10	M1074	500
1203V6	M0150	800
1203V8	M0880	2500
1203V11	M0115	2500
	<b>TOTAL</b>	<b>7995,5</b>

Tabla 13. Motores mayores o iguales a 50 HP instalados área Alcoquímica

**MOTORES  $\geq$  50 HP  
INSTALADOS**

**PLANTA ALCOQUÍMICA**

<b>Equipo</b>	<b>Cédula</b>	<b>Potencia</b>
1002S2	M1256	50
1001V2	M0890	75
1001V5	M0919	50
1003V1	M1322	250
205V3	M0188	50
105V5	M0925	125
105V4	M0926	75
105V3	M0902	125
105V2	M0924	125
105V1	M0944	50
103V3	M0801	125
103V1	M0540	60
1001V3	M0265	75
205V4	M1034	75
107P1	M1144	100
107P2	M1146	100
107P3	M1147	100
107P4	M1148	100
107P5	M1139	125
107P13	M1141	125
	<b>TOTAL</b>	1960

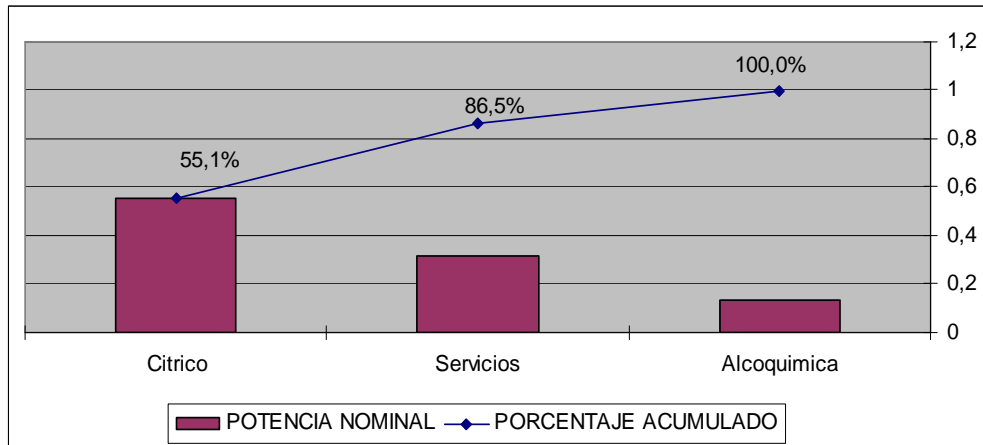
Podemos usar una ayuda en Excel, para mostrar en forma gráfica, cual de las áreas tienen instalada la mayor cantidad de potencia eléctrica en motores.

Tabla 14. Potencia nominal instalada por planta

**MOTORES MAYORES O IGUALES A 50 HP**

<b>Planta</b>	<b>Potencia Nominal</b>	<b>Frecuencia relativa Unitaria (%)</b>	<b>Frecuencia Relativa Acumulada (%)</b>
Citrico	7995,5	55%	55%
Servicios	4545	31%	86%
Alcoquímica	1960	14%	100%
<b>Total</b>	<b>14500,5</b>	<b>100%</b>	

Figura 18. Diagrama de potencia instalada por área



Aquí podemos distinguir fácilmente que el 86% aproximadamente de la potencia instalada es absorbida por las áreas de Servicios y Cítrico, pero principalmente es la planta de Cítrico la que tiene la mayor potencia instalada

Pero no todos los motores instalados se encuentran en uso actualmente, ya que hay algunas áreas que se encuentran fuera de servicio temporalmente y por tal motivo no se puede hacer el análisis de cargabilidad en los motores eléctricos. Existen también equipos con motores especiales, diseñados y adaptados para un uso especial, como es el caso de los compresores 1203V11, 1203V8, 1403V15, 1403V13, 1203V7, los cuales trabajan en algunos casos a voltajes especiales. A estos se les excluye del análisis de eficiencia.

Teniendo esto en cuenta, la cantidad de motores se reduce por planta y únicamente para los motores en funcionamiento y de usos no especiales. En forma gráfica, quedaría resumido así:

Tabla 15. Motores mayores o iguales a 50 HP funcionando área Servicios

**MOTORES  $\geq$  50 HP AREA  
SERVICIOS FUNCIONANDO, EXCEPTO  
MOTORES ESPECIALES Y STANBY**

<b>Equipo</b>	<b>Cédula</b>	<b>Potencia</b>
Pozo 7	M1182	150
903P7	M1348	50
903P12	M0140	60
903P13	M1347	60
903P16	M0666	75
803V13	M1333	60
803V14	M0801	125
804P20	M1193	275
803V6	M1334	60
803V9	M1350	60
803V18	M1196	100
804P3	M0518	60
804P5	M1338	150
804P1	M0527	60
804P10	M1339	150
804P12	M1331	60
804P14	M0517	60
802P4	M0334	150
804P6	M1342	150
<b>TOTAL</b>		<b>1915</b>

Tabla 16. Motores mayores o iguales a 50 HP funcionando planta de Cítrico

**MOTORES  $\geq$  50 HP PLANTA  
CÍTRICO FUNCIONANDO,  
EXCEPTO  
MOTORES ESPECIALES Y STANBY**

Equipo	Cédula	Potencia
6V15	M0844	60
6V18	M0842	60
5V4	M1250	75
6V30	M0850	75
7P21	M1200	75
6V11	M0887	100
05-4V2	M0668	100
05-4V3	M0987	100
6V12	M1054	100,5
5V3	M1082	125
6V32	M0095	125
<b>TOTAL</b>		995,5

Tabla 17. Motores mayores o iguales a 50 HP funcionando planta Alcoquímica

**MOTORES  $\geq$  50 HP PLANTA  
ALCOQUÍMICA FUNCIONANDO,  
EXCEPTO  
MOTORES ESPECIALES Y STANBY**

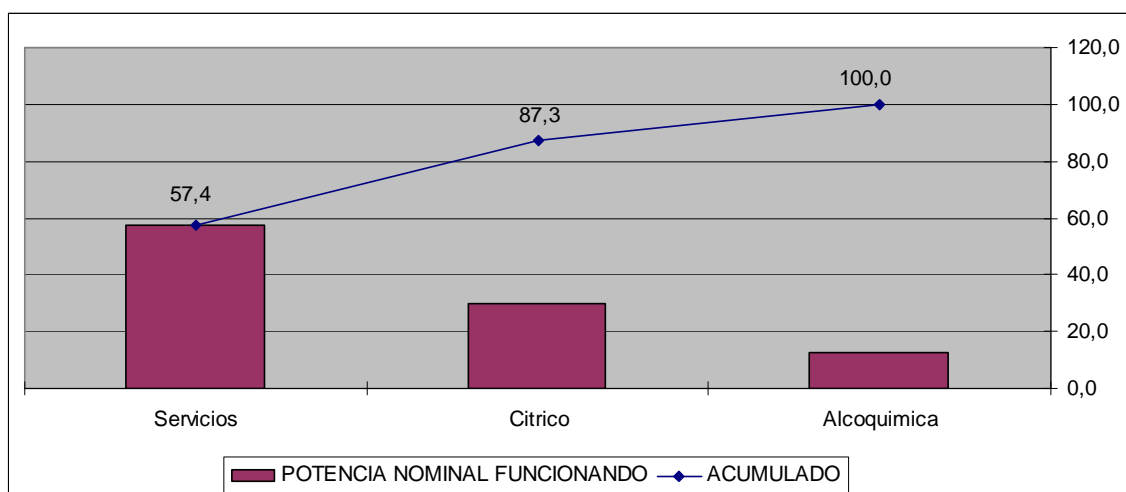
Equipo	Cédula	Potencia
1002S2	M1256	50
1001V2	M0890	75
1001V5	M0919	50
1003V1	M1322	250
<b>TOTAL</b>		425

Tabla 18. Potencia nominal instalada y funcionando por planta

**MOTORES MAYORES O IGUALES A 50 HP  
EN FUNCIONAMIENTO POR PLANTA (SIN MOTORES ESPECIALES NI  
STANBY)**

Planta	Potencia Nominal	%	Acumulado %
Servicios	1915	57,4	57,4
Cítrico	995,5	29,8	87,3
Alcoquímica	425	12,7	100,0
<b>Total</b>	<b>3335,5</b>	<b>100</b>	

Figura 19. Diagrama de potencia instalada funcionando por área



Aquí se muestra que sigue siendo las plantas de Cítrico y Servicios, las áreas donde hay la mayor potencia instalada en motores, pero también indicó ahora que es el área de servicios donde están actualmente la mayoría de los motores iguales o mayores a 50 HP en funcionamiento y consumiendo la mayor potencia.

Inicialmente el trabajo de campo incluyó las mediciones con el analizador de red CIRCUTOR en 32 motores iguales o mayores a 50 HP en las tres áreas (información que se adjuntó en el ítem 4.5 de este informe). Pero en vista de que el último gráfico identificó al área de servicios como el área con mayor potencia instalada, el análisis y cálculo de eficiencia se centrará allí.

## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO ENERGÉTICO DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

### 5.1. EVALUACIÓN DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE SUCROMILES S.A.

Para estimar la potencia y eficiencia real de los motores iguales o mayores a 50 HP en el área de Servicios de la empresa SUCROMILES S.A, se uso el método de la estimación de pérdidas y el método de la corriente; arrojando los siguientes resultados:

Tabla 19. Potencia y eficiencia real en motores área de Servicios

EQUIPO	CÉDULA MOTOR	POTENCIA NOMINAL	POTENCIA REAL SALIDA	% CARGA	EFICIENCIA NOMINAL	EFICIENCIA REAL
802P4	M0334	150 HP	87.50 HP	58.33	93.5%	88.82%
803V6	M1334	60 HP	49.68 HP	82.80	94.1%	85,63%
803V9	M1350	60 HP	45.56 HP	75.93	94.1%	83,97%
803V13	M1333	60 HP	41.43 HP	69.05	94.1%	86,01%
803V14	M0801	125 HP	112.24 HP	89.79	94.5%	87,98%
803V18	M1196	100 HP	72.70 HP	72.70	94.5%	84,37%
804P1	M0527	60 HP	44.36 HP	73.93	92.1%	83,55%
804P3	M0518	60 HP	44,81 HP	74.68	92.1%	86,96%
804P5	M1338	150 HP	128.22 HP	85.48	95.0%	89,17%
804P6	M1342	150 HP	137.32 HP	91.46	95.0%	86.02%
804P10	M1339	150 HP	130.99 HP	87.32	95.0%	89.15%
804P12	M1331	60 HP	41.43 HP	69.05	94.1%	83.77%
804P14	M0517	60 HP	50.65 HP	84.41	92.1%	82,00%
804P20	M1193	275 HP	242.00 HP	88.00	95.6%	90.00%
903P7	M1348	50 HP	41.04 HP	82.08	91.7%	85.90%
903P12	M0140	60 HP	42.31 HP	70.51	92.1%	82.20%
903P13	M1347	60 HP	57.94 HP	86.56	92.1%	89.66%
903P16	M0666	75 HP	52.30 HP	69.73	91.0%	87.04%
P0Z0 7	M1182	150 HP	136.27 HP	90.84	94.5%	89.40%



Como se puede observar en la Tabla 20, la eficiencia encontrada es menor que la eficiencia de placa. Se observa también que los motores que tienen un bajo porcentaje de carga, tienen una menor eficiencia y son los siguientes: 803V9, 803V18, 804P1, 804P12, 804P14, 903P12.

Debido a que cuando un motor opera con un bajo porcentaje de carga, el factor de potencia disminuye, se realizara un análisis económico y energético a los motores que presenten un porcentaje de carga menor al 75%.

Un porcentaje de carga bajo, indica que se están usando motores sobredimensionados. Los cuales son los siguientes:

Tabla 20. Motores con porcentaje de carga menor al 75%

EQUIPO	POTENCIA NOMINAL	POTENCIA REAL	PORCENTAJE DE CARGA
802P4	150 HP	87.50 HP	58.33%
803V13	60 HP	41,43 HP	69.05%
804P12	60 HP	41.43 HP	69.05%
903P16	75 HP	52.30 HP	69.73%
903P12	60 HP	42.31 HP	70.51%
803V18	100 HP	72.70 HP	72.70%
804P1	60 HP	44.36 HP	73.93%
804P3	60 HP	44.81 HP	74.68%

## 5.2. DATOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES

Las mediciones se efectuaron sobre los 34 equipos de las tablas 15, 16, 17 y se midieron los siguientes parámetros: tensión, corriente, potencia, velocidad, resistencia de fase del bobinado; siguiendo la metodología explicada en el capítulo 5 trabajo de campo.

A continuación se muestran los datos obtenidos para los 8 equipos de la tabla 20 a los cuales se les realizó el estudio económico y técnico:

Figura 20. Motor de 150 HP (Equipo 802P4) corriente promedio en las tres fases  
(El valor se debe afectar por 1.732)



Tabla 21. Datos del equipo 802p4, usados en los cálculos

Fecha: 22/06/07 00:46:30				Periodo: 0:01:30			
	L1	L2	L3	III			
Tensión (V)	450	448	447	448			
Tensión Máx (V)	452	450	449				
Tensión Mín. (V)	447	445	444				
Corriente (A)	68	69	61	66			
Corriente Máx. (A)	70	72	64				
Corriente Mín. (A)	65	66	58				
Potencia (W)	8429	10061	8433	26923			
P. Reactiva L (var)	15481	15029	13443	43953			
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0			
F Potencia	0.47	0.55	0.53	0.52			
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)		
Energía	22929.374		38043.099		0.000		
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	16	DC 2	12		

Solo en esta medición el valor de la corriente y el factor de potencia se deben afectar por 1.732 debido a que la medición se hizo en el motor en corriente de fase, por la dificultad de instalar el equipo de medición en corriente de línea.

Figura 21. Motor de 60 HP (Equipo 803V13) corriente promedio en las tres fases

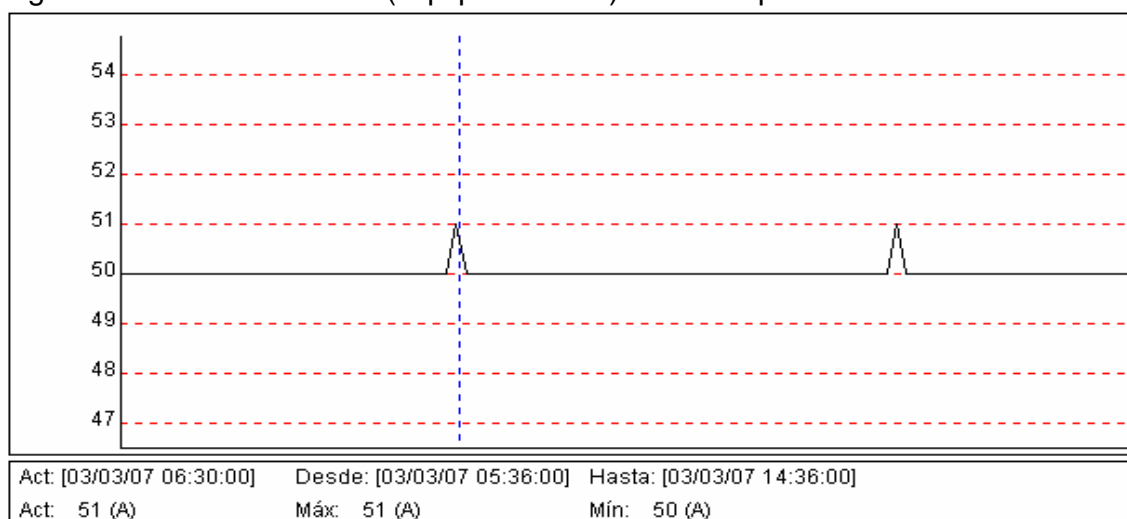


Tabla 22. Datos del equipo 803V13, usados en los cálculos

Fecha: 03/03/07 06:30:00				Periodo: 0:01:30			
	L1	L2	L3	III			
Tensión (V)	453	452	451	452			
Tensión Máx. (V)	455	454	453				
Tensión Mín. (V)	452	450	448				
Corriente (A)	50	53	50	51			
Corriente Máx. (A)	50	54	51				
Corriente Mín. (A)	49	52	50				
Potencia (W)	11516	12441	11981	35938			
P. Reactiva L (var)	6259	6345	5552	18156			
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0			
F Potencia	0.88	0.89	0.91	0.89			
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)		
Energía	34136.602		17428.796		0.000		
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	1	DC 2	1		

Figura 22. Motor de 60 HP (Equipo 804P12) corriente promedio en las tres fases

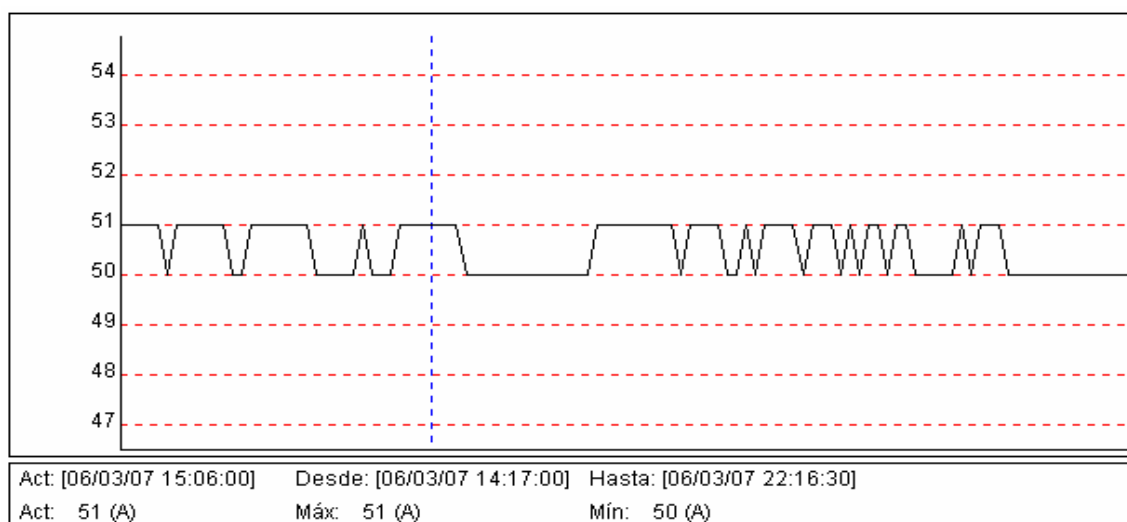


Tabla 23. Datos del equipo 804P12, usados en los cálculos

Fecha: 06/03/07 15:06:00				Periodo: 0:01:30	
	L1	L2	L3	III	
Tensión (V)	469	468	469	468	
Tensión Máx. (V)	470	469	470		
Tensión Mín. (V)	461	461	460		
Corriente (A)	53	50	50	51	
Corriente Máx. (A)	54	52	52		
Corriente Mín. (A)	51	50	50		
Potencia (W)	12727	12274	11898	36899	
P. Reactiva L (var)	6801	6220	6846	19867	
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0	
F. Potencia	0.88	0.89	0.86	0.88	
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)
Energía	32026.344		17509.587		0.000
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	16	DC 2	11

Figura 23. Motor de 75 HP (Equipo 903P16) corriente promedio en las tres fases

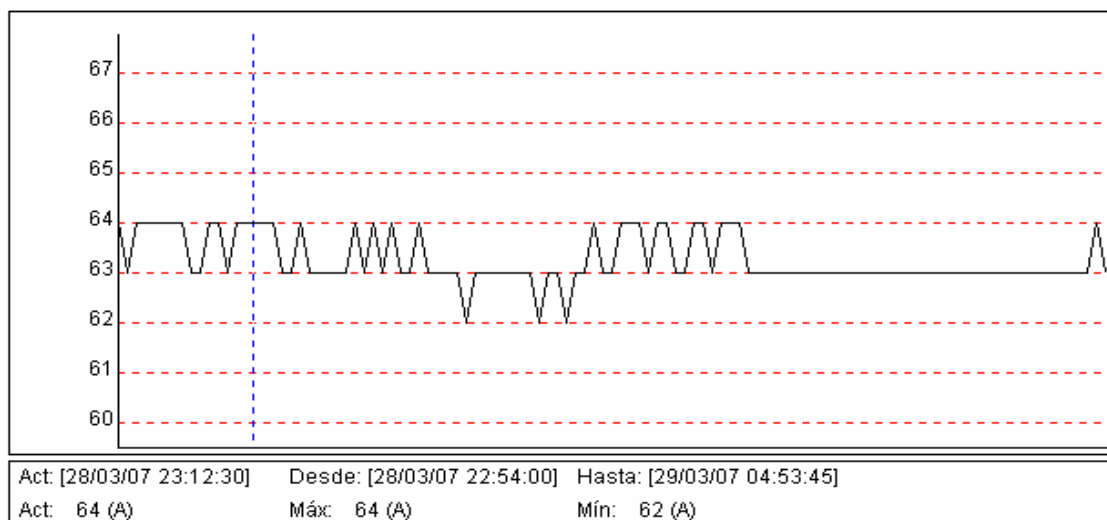


Tabla 24. Datos del equipo 903P16, usados en los cálculos

Fecha: 28/03/07 23:12:30				Periodo: 0:01:15	
	L1	L2	L3	III	
Tensión (V)	433	431	431	431	
Tensión Máx. (V)	434	432	432		
Tensión Mín. (V)	432	431	430		
Corriente (A)	62	67	63	64	
Corriente Máx. (A)	62	67	64		
Corriente Mín. (A)	61	65	62		
Potencia (W)	14354	15572	14904	44830	
P. Reactiva L (var)	6050	6429	5218	17697	
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0	
F Potencia	0.92	0.92	0.94	0.93	
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)
Energía	16269.252		6451.938		0.000
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	0	DC 2	0

Figura 24. Motor de 60 HP (Equipo 903P12) corriente promedio en las tres fases

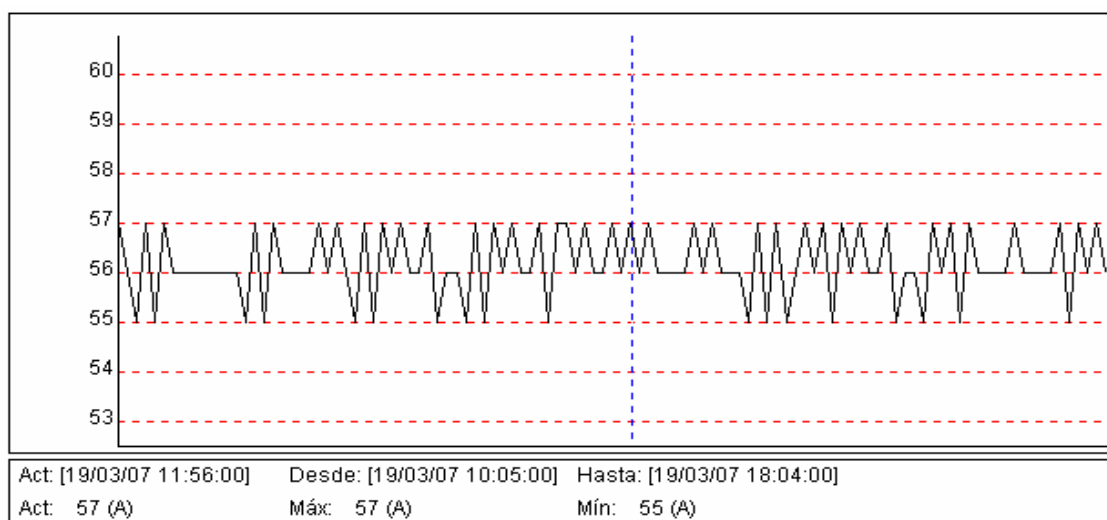


Tabla 25. Datos del equipo 903P12, usados en los cálculos

Fecha: 19/03/07 12:56:00				Periodo: 0:02:00			
	L1	L2	L3	III			
Tensión (V)	454	452	450	452			
Tensión Máx (V)	456	454	452				
Tensión Mín. (V)	452	450	448				
Corriente (A)	59	57	54	56			
Corriente Máx. (A)	59	58	55				
Corriente Mín. (A)	58	57	53				
Potencia (W)	13519	12649	12232	38400			
P. Reactiva L (var)	7594	8475	6972	23041			
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0			
F. Potencia	0.87	0.83	0.86	0.85			
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)		
Energía	110542.781		65999.239		0.000		
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	10	DC 2	10		

Figura 25. Motor de 100 HP (Equipo 803V18) corriente promedio en las tres fases

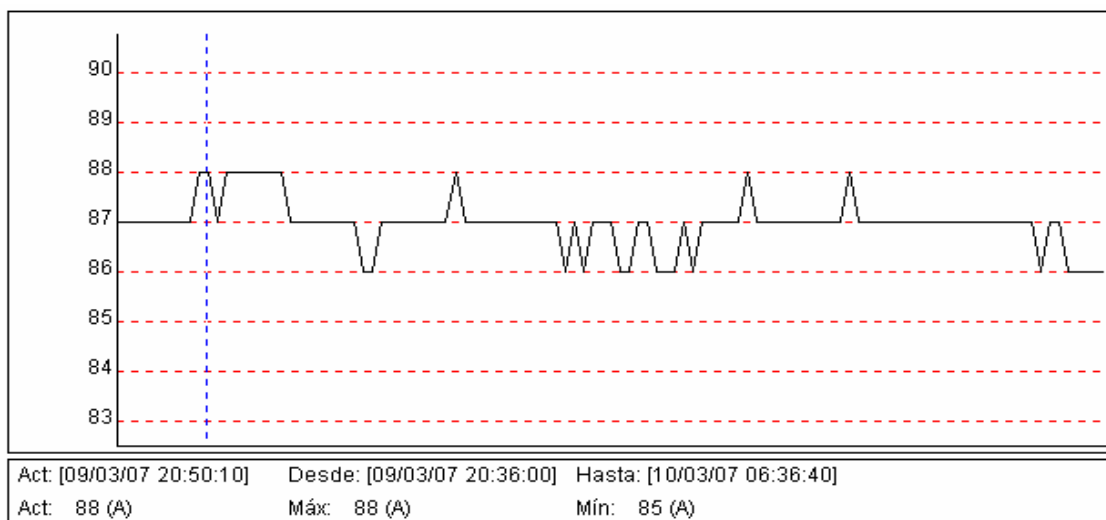


Tabla 26. Datos del equipo 803V18, usados en los cálculos

Fecha: 09/03/07 20:50:10				Periodo: 0:01:25	
	L1	L2	L3	III	
Tensión (V)	464	466	463	464	
Tensión Máx. (V)	466	468	465		
Tensión Mín. (V)	461	463	460		
Corriente (A)	87	91	86	88	
Corriente Máx. (A)	88	93	87		
Corriente Mín. (A)	86	90	85		
Potencia (W)	21239	22252	20791	64282	
P. Reactiva L (var)	9513	10729	10687	30929	
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0	
F Potencia	0.91	0.90	0.89	0.90	
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)
Energía	19517.914		9433.878		0.000
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	18	DC 2	13

Figura 26. Motor de 60 HP (Equipo 804P1) corriente promedio en las tres fases

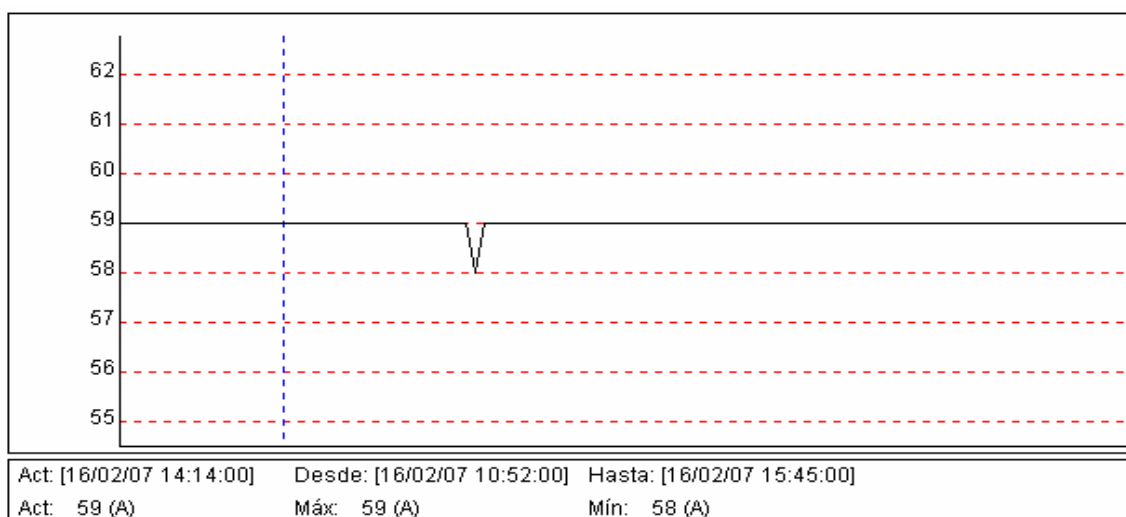


Tabla 27. Datos del equipo 804P1, usados en los cálculos

Fecha: 16/02/07 14:14:00				Periodo: 0:01:00			
	L1	L2	L3	III			
Tensión (V)	433	435	434	434			
Tensión Máx. (V)	435	436	435				
Tensión Mín. (V)	433	435	433				
Corriente (A)	58	62	59	59			
Corriente Máx. (A)	58	62	59				
Corriente Mín. (A)	58	61	58				
Potencia (W)	13019	13777	12816	39612			
P. Reactiva L (var)	6593	7347	7598	21538			
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0			
F. Potencia	0.89	0.88	0.86	0.87			
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)		
Energía	132358.966		72961.095		0.000		
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	1	DC 2	1		



Figura 27. Motor de 60 HP (Equipo 804P3) corriente promedio en las tres fases

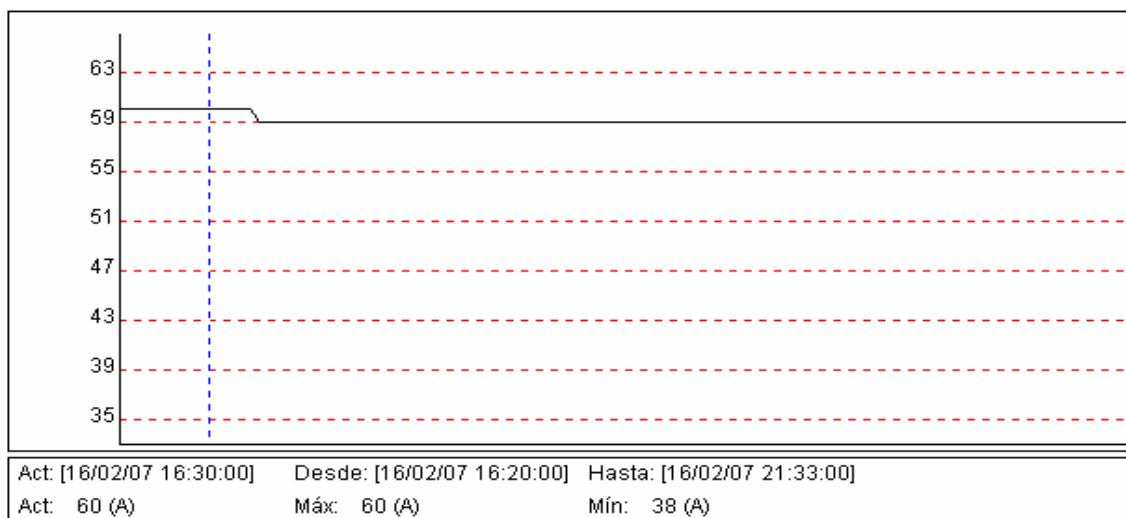


Tabla 28. Datos del equipo 804P3, usados en los cálculos

Fecha: 16/02/07 16:30:00				Periodo: 0:01:00	
	L1	L2	L3	III	
Tensión (V)	438	440	438	438	
Tensión Máx. (V)	439	440	439		
Tensión Mín. (V)	438	439	438		
Corriente (A)	58	63	59	60	
Corriente Máx. (A)	58	64	60		
Corriente Mín. (A)	58	63	59		
Potencia (W)	12601	13484	12357	38442	
P. Reactiva L (var)	7719	8809	9017	25545	
P. Reactiva C (var)	0	0	0	0	
F. Potencia	0.85	0.83	0.81	0.83	
	Activa (Wh)		React. L (varh)		React. C (varh)
Energía	11059.204		7373.755		0.000
Frecuencia (Hz)	60.00	DC 1	15	DC 2	11

### 5.3.

## 5.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico de la operación de los motores, se ha usado el software “EVAMOTOR”, desarrollado en el programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Occidente en el Grupo de Investigación en Energías GIEN.

**5.3.1 Motor de 150 HP ( Equipo 802P4).** Este motor tiene una potencia de placa de 150 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 87.5 HP. El motor opera durante todo el año. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 100 HP, la inversión se recupera después del cuarto año. La opción de comprar un motor nuevo no es la más adecuada.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor de alta eficiencia de 100 HP es adecuada por que la inversión se recupera en dos años.

Reemplazo por motor existente. Otra solución es utilizar un motor disponible de 100 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia. Esta es la opción mas adecuada.

Este es un motor de eficiencia estándar y cumple la función de ser un motor de “stanby” el cual debe reemplazar a un motor de 150 HP de alta eficiencia que es el el principal, en caso de falla. Casi siempre está operando el motor de eficiencia estandar. Otra solución es operar el motor de alta eficiencia que se encuentra fuera de servicio.

**5.3.2 Motor de 60 HP (Equipo 803V13).** Este motor tiene una potencia de placa de 60 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 41.43 HP. Su funcionamiento promedio es de seis meses al año actualmente. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 50 HP, la inversión no se alcanza a recuperar al final del tiempo de vida útil del motor. La opción de comprar un motor nuevo se desecha.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor de alta eficiencia de 50 HP no es

una buena oportunidad debido a que la inversión solo se recupera después del cuarto año. Si las condiciones de operación cambian como se prevee y el motor opera durante todo el año, esta opción de invertir en un motor nuevo de alta eficiencia en vez de reparar si se aconseja porque la inversión se recupera en el primer año.

Reemplazo por motor existente. Otra solución es utilizar un motor disponible de 50 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia. Esta es la opción mas económica.

**5.3.3. Motor de 60 HP (Equipo 804P12).** Este motor tiene una potencia de placa de 60 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 41.43 HP. Su funcionamiento promedio es de seis meses. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 50 HP, la inversión se recupera después del cuarto año. La opción de comprar un motor nuevo se desecha.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor nuevo de alta eficiencia de 50 HP, es buena porque la inversión se recupera en el segundo año.

Reemplazo por motor existente. Si existe un motor disponible de 50 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia, sería la opción mas económica y adecuada.

**5.3.4 Motor de 75 HP (Equipo 903P16).** Este motor tiene una potencia de placa de 75 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 52.3 HP. El motor opera durante todo el año. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 60 HP, la inversión se recupera en tres años. La opción de comprar un motor nuevo es apropiada.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor de alta eficiencia de 60 HP es una opción buena por que la inversión se recupera en dos años.

Reemplazo por motor existente: Si existe un motor disponible de 60 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia, sería la opción mas acertada.

Este es uno de los equipos críticos dentro de la empresa, el cual se encuentra operando constantemente con una planta de emergencia, para garantizar su continuidad; el análisis efectuado de este motor indica que no es un caso preocupante, no obstante si en algún proyecto se necesitase un motor de 75 HP, se podría usar este y comprar uno nuevo de alta eficiencia. Esta es otra opción adecuada.

**5.3.5 Equipo 903P12.** Este motor tiene una potencia de placa de 60 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 42.3 HP. El promedio de operación es de seis meses al año. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 50 HP, la inversión se recupera en tres años. La opción de comprar un motor nuevo es apropiada.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor de alta eficiencia de 50 HP sería una solución acertada porque la inversión se recupera en dos años. Es aconsejable comprar motor nuevo.

Reemplazo por motor existente. Otra solución es utilizar un motor disponible de 50 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia. Esta es la opción mas adecuada.

**5.3.6 Motor de 100 HP (Equipo 803V18).** Este motor tiene una potencia de placa de 100 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 72.7 HP. Opera durante todo el año. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 90 HP, la inversión se recupera en dos años. La opción de comprar un motor nuevo es apropiada.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor de alta eficiencia de 90 HP sería una solución acertada porque la inversión se recupera en un año. Es aconsejable comprar motor nuevo.

Reemplazo por motor existente. Otra solución es utilizar un motor disponible de 90 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia. Esta es la opción mas económica.

**5.3.7 Motor de 60 HP (Equipo 804P1).** Este motor tiene una potencia de placa de 60 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 44.36 HP. El promedio de operación al año es de seis meses. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 50 HP, la inversión se recupera después de cuatro años. La opción de comprar un motor nuevo no es apropiada.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor de alta eficiencia de 50 HP sería una solución acertada porque la inversión se recupera en dos años. Es aconsejable comprar motor nuevo.

Reemplazo por motor existente. Otra solución es utilizar un motor disponible de 50 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia. Esta es la opción mas económica.

No es un caso crítico.

**5.3.8 Motor de 60 HP (Equipo 804P3).** Este motor tiene una potencia de placa de 60 HP pero en la aplicación actual solo se requiere una potencia de 44.81 HP. El promedio de operación al año es de seis meses. Las opciones son las siguientes:

Compra de motor nuevo reemplazando el existente: Si se compra un motor nuevo de alta eficiencia de 50 HP, la inversión no se recupera durante el tiempo de vida útil del motor. La opción de comprar un motor nuevo no es apropiada.

Reparar o comprar un motor nuevo: Si el motor existente llegara fallar, la opción de no reparar y mas bien invertir en un motor de alta eficiencia de 50 HP sería una solución no apropiada porque la inversión se recupera solo después de cuatro años. Se desecha esta opción de comprar motor nuevo.

Reemplazo por motor existente. Otra solución es utilizar un motor disponible de 50 HP que se encuentre en la empresa; preferiblemente si es alta eficiencia. Esta es la opción más económica.

No es un caso crítico.

#### **5.4. PROPUESTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE OPERACIÓN**

**5.4.1 Motor de 150 HP (Equipo 802P4).** Para este equipo se recomienda buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 100 HP preferiblemente de alta eficiencia.

Si el motor existente falla, se recomienda buscar o comprar un motor de 100 HP de alta eficiencia.

Junto a este equipo existe un equipo similar con un motor de 150 HP de alta eficiencia que es el equipo 802P5 y este es el motor que debería estar funcionando constantemente; pero normalmente está en servicio el equipo 802P4 que es el que tiene el motor de 150 HP estándar. Se recomienda poner en servicio el equipo 802P5.

**5.4.2. Motor de 60 HP (Equipo 803V13).** Para este equipo se recomienda buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 50 HP preferiblemente de alta eficiencia o si las condiciones de operación cambian como se prevee y el motor opera todo el año, se recomienda cambiarlo por un motor de 50 HP de alta eficiencia si el motor existente llega a fallar.

**5.4.3. Motor de 60 HP (Equipo 804P12).** Para este equipo se recomienda buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 50 HP preferiblemente de alta eficiencia o en caso de que el motor existente falle, se recomienda cambiarlo por un motor de 50 HP de alta eficiencia.

**5.4.4. Motor de 75 HP (Equipo 903P16).** Para este equipo se recomiendan cuatro soluciones:

Buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 60 HP preferiblemente de alta eficiencia.

Comprar un motor de 60 Hp de alta eficiencia para cambiar el existente.

Si el motor existente falla, cambiarlo por uno de alta eficiencia de 60 HP.

Si hay un proyecto donde se necesite un motor de 75 HP usar este y comprar un motor nuevo de alta eficiencia de 60 HP.

**5.4.5. Motor de 60 HP (Equipo 903P12).** Para este equipo se recomiendan tres soluciones:

Buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 50 HP preferiblemente de alta eficiencia.

Comprar un motor de 50 HP de alta eficiencia para cambiar el existente.

Si el motor existente falla, cambiarlo por uno de alta eficiencia de 50 HP.

**5.4.6. Motor de 100 HP (Equipo 803V18).** Para este equipo se recomiendan tres soluciones:

Buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 90 HP preferiblemente de alta eficiencia.

Comprar un motor de 90 Hp de alta eficiencia para cambiar el existente.

Si el motor existente falla, cambiarlo por uno de alta eficiencia de 90 HP.

**5.4.7. Motor de 60 HP (Equipo 840P1).** Para este equipo se recomienda buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 50 HP preferiblemente de alta eficiencia o en caso de que el motor existente falle, se recomienda cambiarlo por un motor de 50 HP de alta eficiencia.

**5.4.8. Motor de 60 HP (Equipo 804P3).** Para este equipo se recomienda buscar un motor que se encuentre disponible dentro de la planta de 50 HP preferiblemente de alta eficiencia.

## **7. CONCLUSIONES**

El estudio muestra la importancia de hacer una gestión energética de motores eléctricos, porque nos indica que se debe hacer ante la posibilidad de comprar o reemplazar motores en funcionamiento que no estén operando en una aplicación apropiada o en caso de falla de motores.

Se ha aplicado la metodología de gestión energética a los motores de la empresa SUCROMILES S.A. con resultados interesantes desde el punto de vista técnico y económico.

Con el estudio de gestión energética se ha encontrado que los motores en SUCROMILES S.A. en general trabajan con una eficiencia aceptable lo que indica que se encuentran en una aplicación adecuada

Se aplicaron dos metodologías para evaluar motores en sitio, usando métodos de fácil aplicación.

En la gestión energética realizada se observa que la eficiencia real encontrada en los motores, está muy por debajo de la eficiencia nominal de placa de los motores, lo que indica que existe una probabilidad y es que la eficiencia que asegurada por los fabricantes no sea la real.



## **BIBLIOGRAFÍA**

COWERN, Edgard H. Artículos técnicos de Cowern. Wallingford: Baldor Motors & Drives, 1999. 115 p.

Evamotor, Software de eficiencia energética en motores eléctricos. Desarrollado en la Universidad Autónoma de Occidente. Grupo de investigación en Energías, GIEN. Cali, Colombia, 2006. 1 Software.

ISAGEN. Línea productiva: Eficiencia de motores eléctricos. Vol. 1, No.1 ( Ene. 2007); p. 2-12.

PROCOBRE. Uso eficiente de la energía eléctrica. Vol. 1, No 3 ( Abr. 2002 ); p. 1-35.

QUISPE, Enrique Ciro. CASTRILLÓN, Rosaura. VIDAL, Juan R. Recomendaciones para la implementación de un programa integral de ahorro de energía en el sistema de motores eléctricos en la industria. Memorias de CIURRE 2006, Cali, Colombia, Noviembre 2006. 12 p.

QUISPE, Enrique Ciro. Curso tutorial: Métodos para el uso eficiente de energía en la aplicación industrial de motores eléctricos. XII Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Ramas Afines, Trujillo, Perú, Octubre 2005. 34 p.